

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2001 年 3 月 22 日 (22.03.2001)

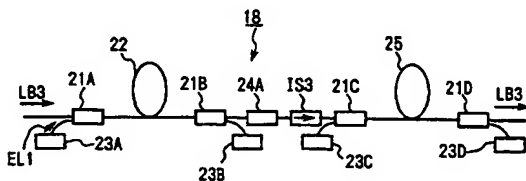
PCT

(10) 国際公開番号
WO 01/20651 A1

- (51) 国際特許分類: H01L 21/027, G03F 7/20, G02F 1/37, H01S 3/06, 3/00 (74) 代理人: 大森 聡(OMORI, Satoshi); 〒214-0014 神奈川県川崎市多摩区登戸2075番2-501 大森特許事務所 Kanagawa (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP00/06130
- (22) 国際出願日: 2000 年 9 月 8 日 (08.09.2000)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ: 特願平11/258131 1999 年 9 月 10 日 (10.09.1999) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 株式会社 ニコン (NIKON CORPORATION) [JP/JP]; 〒100-8331 東京都千代田区丸の内三丁目2番3号 富士ビル Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 大槻朋子 (OHT-SUKI, Tomoko) [JP/JP]; 〒100-8331 東京都千代田区丸の内三丁目2番3号 富士ビル 株式会社 ニコン 知的財産部内 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZW.
- (84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ特許 (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- 添付公開書類:
— 国際調査報告書
- 2 文字コード及び他の略語については、定期発行される各 PCT ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(54) Title: EXPOSURE DEVICE WITH LASER DEVICE

(54) 発明の名称: レーザ装置を備えた露光装置



(57) Abstract: An exposure device has a light source comprising a laser device that is small and easy to maintain. The laser device comprises a laser oscillator for generating a single-wavelength laser beam (LB3) within a wavelength range including infrared and visible regions; an optical amplifier (18) for amplifying a laser beam (LB3); and a wavelength converter for converting the amplified laser beam into ultra-violet light using a nonlinear optical crystal. The optical amplifier (18) includes a plurality of stages of fiber optic amplifiers (22, 25) for sequential amplification of the laser beam (LB3), and a narrow-band filter (24A) and an isolator (IS3) arranged between fiber optic amplifiers.

WO 01/20651 A1

(57) 要約:

小型で、かつメンテナンスの容易なレーザ装置を露光光源として備えた露光装置である。そのレーザ装置は、赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光（LB3）を発生するレーザ光発生部と、そのレーザ光（LB3）を増幅する光増幅部（18）と、この光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部とを備えており、その光増幅部（18）は、そのレーザ光（LB3）を順次増幅する複数段の光ファイバー増幅器（22, 25）と、この複数段の光ファイバー増幅器の間に配置された狭帯域フィルタ（24A）及びアイソレータ（IS3）とを有する。

明 細 書

レーザ装置を備えた露光装置

5 技術分野

本発明は、紫外光を発生するレーザ装置を備えた露光装置に関し、特に半導体素子、撮像素子（ＣＣＤなど）、液晶表示素子、プラズマディスプレイ素子、及び薄膜磁気ヘッドなどのマイクロデバイスを製造するためのフォトリソグラフィ工程で使用される露光装置に使用して好適なものである。

背景技術

例えば半導体集積回路を製造するためのフォトリソグラフィ工程で使用される露光装置は、マスクとしてのレチクル（フォトマスク）上に精密に描かれた回路パターンを、基板としてのフォトレジストを塗布したウエハ上に光学的に縮小して投影露光する。この露光時におけるウエハ上での最小パターン寸法（解像度）を小さくするのに最も単純かつ有効な方法の一つは、露光光の波長（露光波長）を短くすることである。ここで露光光の短波長化の実現と合わせて、露光光源を構成する上で備えるべきいくつかの条件につき説明する。

第１に、例えば数ワットの光出力が求められる。これは集積回路パターンの露光、転写に要する時間を短くして、スループットを高めるために必要である。

第２に、露光光が波長 300 nm 以下の紫外光の場合には、投影光学系の屈折部材（レンズ）として使用できる光学材料が限られ、色収差の補正が難しくなってくる。このため露光光の単色性が必要であり、露光

光のスペクトル線幅は1 pm程度以下にすることが求められる。

第3に、このスペクトル線幅の狭帯化に伴い時間的コヒーレンス（可干渉性）が高くなるため、狭いスペクトル線幅（波長幅）の光をそのまま照射すると、スペックルと呼ばれる不要な干渉パターンが生ずる。従ってこのスペックルの発生を抑制するために、露光光源では空間的コヒーレンスを低下させる必要がある。

これらの条件を満たす従来の短波長の光源の一つは、レーザの発振波長自身が短波長であるエキシマレーザを用いた光源であり、もう一つは赤外又は可視域のレーザの高調波発生を利用した光源である。

このうち、前者の短波長光源としては、KrFエキシマレーザ（波長248 nm）が使用されており、現在では更に短波長のArFエキシマレーザ（波長193 nm）を使用する露光装置の開発が進められている。更に、エキシマレーザの仲間であるF₂レーザ（波長157 nm）の使用も提案されている。しかし、これらのエキシマレーザは大型であること、発振周波数が現状では数kHz程度であるため、単位時間当たりの照射エネルギーを高めるためには1パルス当たりのエネルギーを大きくする必要があり、このためにいわゆるコンパクション等によって光学部品の透過率変動等が生じやすいこと、メンテナンスが煩雑でかつ費用が高額となることなどの種々の問題があった。

また後者の方法としては、非線形光学結晶の2次の非線形光学効果を利用して、長波長の光（赤外光、可視光）をより短波長の紫外光に変換する方法がある。例えば文献「"Longitudinally diode pumped continuous wave 3.5W green laser", L. Y. Liu, M. Oka, W. Wiechmann and S. Kubota; Optics Letters, vol. 19, p189 (1994)」では、半導体レーザ光で励起された固体レーザからの光を波長変換するレーザ光源が開示されている。この従来例では、Nd:YAGレーザの発する1064 nmの

レーザ光を、非線形光学結晶を用いて波長変換し、4倍高調波の266 nmの光を発生させる方法が記載されている。なお、固体レーザとは、レーザ媒質が固体であるレーザの総称である。

また、例えば特開平8-334803号公報及び対応する米国特許第5,838,709号では、半導体レーザを備えたレーザ光発生部と、このレーザ光発生部からの光を非線形光学結晶により紫外光に波長変換する波長変換部とから構成されるレーザ要素を複数個、マトリックス状（例えば 10×10 ）に束ねたアレイレーザが提案されている。

このような構成の従来のアレイレーザでは、個々のレーザ要素の光出力を低く抑えつつ、装置全体の光出力を高出力とすることができ、各非線形光学結晶への負担を軽減することができる。しかし、一方では、個々のレーザ要素が独立していることから、露光装置への適用を考慮した場合には、レーザ要素全体でその発振スペクトルを全幅で1 pm程度以下まで一致させる必要がある。

このため、例えば、各レーザ要素に自律的に同一波長の単一縦モード発振をさせるためには、各々のレーザ要素の共振器長を調整し、あるいは共振器中に波長選択素子を挿入したりする必要があった。しかし、これらの方法は、その調整が微妙であること、構成するレーザ要素が多くなればなるほど全体を同一波長で発振させるのに複雑な構成が必要になること等の問題があった。

一方、これら複数のレーザを能動的に単一波長化する方法としてインジェクションシード法がよく知られている（例えば、「Walter Koechner; Solid-state Laser Engineering, 3rd Edition, Springer Series in Optical Science, Vol. 1, Springer-Verlag, ISBN 0-387-53756-2, p. 246-249」参照）。これは、発振スペクトル線幅の狭い単一のレーザ光源からの光を複数のレーザ要素に分岐し、このレーザ光を誘導波とし

て用いることにより、各レーザ要素の発振波長を同調させ、かつスペクトル線幅を狭帯域化するという方法である。しかし、この方法では、シード光を各レーザ要素に分岐する光学系や、発振波長の同調制御部を必要とするため構造が複雑になるという問題があった。

5 更に、このようなアレイレーザは、従来のエキシマレーザに比べて装置全体を格段に小さくすることが可能だが、それでもアレイ全体の出力ビーム径を数 cm 以下におさえるパッケージングは困難であった。また、このように構成されたアレイレーザでは、各アレイごとに波長変換部が必要となるため高価となること、アレイを構成するレーザ要素の一部に
10 アライメントずれが生じた場合や構成する光学素子に損傷が発生した場合に、このレーザ要素の調整をするためには、一度アレイ全体を分解してこのレーザ要素を取り出し、調整した上で再度アレイを組み立て直す必要があること、などの課題があった。

また、そのような光源を光ファイバーを用いて構成することも考えら
15 れるが、単に光ファイバーを用いて強度の強い光を伝播させると、光ファイバーの非線形効果に起因した Self Phase Modulation (以下、「SPM」と言う)、Stimulated Raman Scattering (以下、「SRS」と言う)、Stimulated Brillouin Scattering (以下、「SBS」と言う)等の影響で伝播光の波長幅が広がるという不都合がある。このような波
20 長幅の広がりによって、露光光のスペクトル線幅を 1 pm 程度以下にするための余裕度(マージン)が低下することになる。

本発明は斯かる点に鑑み、露光装置の光源に使用できると共に、装置を小型化でき、かつメンテナンスの容易なレーザ装置を備えた露光装置を提供することを第 1 の目的とする。

25 更に本発明は、使用する光学素子の非線形効果に起因した波長幅の広がりを抑制できるレーザ装置を備えた露光装置を提供することを第 2 の

目的とする。

更に本発明は、発振周波数を高くして、かつ空間的コヒーレンスを低減できると共に、全体としての発振スペクトル線幅を簡単な構成で狭くできるレーザ装置を備えた露光装置を提供することを第3の目的とする。

5 更に本発明は、そのような露光装置を用いた露光方法、デバイスの製造方法、及びそのような露光装置の効率的な製造方法を提供することをも目的とする。

発明の開示

10 本発明による第1の露光装置は、レーザ装置からの紫外光で第1物体（163）のパターンを照明し、該第1物体のパターンを経た紫外光で第2物体（166）を露光する露光装置であって、そのレーザ装置は、赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部（11）と、このレーザ光発生部から発生されたレーザ光
15 を順次増幅する複数段の光ファイバー増幅器（22, 25）と、この複数段の光ファイバー増幅器の間に配置された狭帯域フィルタ（24A）及びアイソレータ（IS3）とを有する光増幅部（18）と、この光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部（20）とを備えたものである。

20 この場合、複数段の光ファイバー増幅器間にはASE（Amplified Spontaneous Emission）を時間的に取り除くために、パルス光が通過するときだけオンにするゲートの働きを行う素子、例えば音響光学素子（AOM）や電気光学素子（EOM）を挿入してもよい。

25 また、本発明による第2の露光装置は、レーザ装置からの紫外光で第1物体のパターンを照明し、該第1物体のパターンを経た紫外光で第2物体を露光する露光装置であって、そのレーザ装置は、赤外域から可視

域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部
(11)と、このレーザ光発生部から発生されたレーザ光を増幅する複
数の増幅用光ファイバー(22, 25)と、複数の増幅用の励起光を発生
する励起光発生光源(23A)と、その複数の増幅用光ファイバーの
5 間に配置された狭帯域フィルタ(24A)又はアイソレータ(IS3)
と、この狭帯域フィルタ又はアイソレータと並列にその励起光を通過さ
せるためのバイパス部材(21B, 21C, 30)とを有する光増幅部
(18A; 18B)と、この光増幅部によって増幅されたレーザ光を非
線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部(20)とを備
10 えたものである。

また、本発明による第3の露光装置は、レーザ装置からの紫外光で第
1物体のパターンを照明し、該第1物体のパターンを経た紫外光で第2
物体を露光する露光装置であって、そのレーザ装置は、赤外域から可視
域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部
15 (11)と、このレーザ光発生部から発生されたレーザ光を順次増幅す
る複数段の光ファイバー増幅器(22, 25)と、この複数段の増幅用
光ファイバーのそれぞれのために励起光を発生する複数の励起光発生光
源(23A, 23D)と、その複数段の増幅用光ファイバーの間に配置
された狭帯域フィルタ(24A)とを備え、狭帯域フィルタの両側に結
20 合された光ファイバー端に励起光を反射するための反射膜が形成された
光増幅部(18C)と、この光増幅部によって増幅されたレーザ光を非
線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部(20)とを備
えたものである。

また、本発明による第4の露光装置は、レーザ装置からの紫外光で第
25 1物体のパターンを照明し、該第1物体のパターンを経た紫外光で第2
物体を露光する露光装置であって、そのレーザ装置は、赤外域から可視

域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部（１１）と、このレーザ光発生部から発生されたレーザ光を所定周波数で所定幅のパルス光に変換する光変調部（１２）と、この光変調部を通過したレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器（２２，２５）を有する光増幅部（１８－１）と、この光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部（２０）とを備え、その光変調部で変換されるパルス光の幅は、最終的に発生する紫外光で所定の波長幅を得るためのパルス幅よりも広く設定されるものである。

また、本発明の第５の露光装置は、レーザ装置からの紫外光で第１物体のパターンを照明し、該第１物体のパターンを経た紫外光で第２物体を露光する露光装置であって、そのレーザ装置は、赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部（１１）と、このレーザ光発生部から発生されたレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器（２５）と、この光ファイバー増幅器で増幅されたレーザ光を伝播する伝送用光ファイバー（２６）と、その光ファイバー増幅器とその伝送用光ファイバーとの間に配置された狭帯域フィルタ（２４Ａ）とを有する光増幅部（１８Ｄ）と、この光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部（２０）とを備えたものである。

また、本発明の第６の露光装置は、レーザ装置からの紫外光で第１物体のパターンを照明し、該第１物体を経た紫外光で第２物体を露光する露光装置であって、そのレーザ装置は、赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部（１１）と、そのレーザ光を複数に分岐する光分岐装置と、その複数に分岐されたレーザ光をそれぞれ独立に増幅する複数の光ファイバー増幅器と、その増幅さ

れたレーザ光を紫外光に波長変換する波長変換部（20）とを有し、その複数の分岐されたレーザ光の出力をほぼ均一とするように、その複数の光ファイバー増幅器の少なくとも1つでの増幅利得を調整する調整装置を備えるものである。

5 斯かる本発明の各露光装置によれば、そのレーザ装置中のレーザ光発生部としては、例えば発振波長が制御されたDFB（Distributed feed back）半導体レーザ、又はファイバーレーザ等の小型で発振スペクトルの狭い光源を使用することができる。そして、そのレーザ光発生部から
10 の単一波長のレーザ光を複数段の光ファイバー増幅器で増幅した後、非線形光学結晶で紫外光に変換することによって、高出力で単一波長の狭いスペクトル幅の紫外光を得ることができる。従って、小型でかつメンテナンスの容易なレーザ装置を備えた露光装置を提供できる。

 この場合、光ファイバー増幅器としては、例えばエルビウム（Er）・ドープ・光ファイバー増幅器（Erbium-Doped Fiber Amplifier: ED
15 FA）、イッテルビウム（Yb）・ドープ・光ファイバー増幅器（YDFA）、プラセオジム（Pr）・ドープ・光ファイバー増幅器（PDFA）、又はツリウム（Tm）・ドープ・光ファイバー増幅器（TDFA）等を使用することができるが、これらの光ファイバー増幅器に強い光を伝播させると、非線形効果に起因して波長幅が広がる恐れがある。

20 その非線形効果中でSPM（Self Phase Modulation）、及びSRS（Stimulated Raman Scattering）による波長幅広がりにはファイバー長が長いほど大きくなる。例えば、簡単なモデルでは、SPMによる波長幅広がりにはファイバー長に比例する。従ってファイバー長を短くすることでSPMによる波長幅広がりを小さく抑えることができる。また、SRS
25 Sが起こり始める光強度をSRS閾値とすると、SRS閾値はファイバー長に反比例する。従ってファイバー長を短くすることでSRS閾値を

増加させ、SRSが起こりにくくすることで、光ファイバー増幅器出力の波長幅広がりを抑える効果が得られる。SPM, SRS何れの場合にもファイバー長を短くすることで、波長幅広がり低減できる。

次に、SRS及びSBS (Stimulated Brillouin Scattering) は、
5 ファイバーを伝播する光がフォノンによる散乱を受け、フォノン・サイドバンドに散乱される現象である。フォノン・サイドバンドに散乱された光の波長は、フォノンの波長分だけ元の波長とは異なり、元の波長幅に対して波長幅が広がることになる。更に、SRS及びSBSではフォ
10 ノン・サイドバンドに散乱された光がコヒーレントに増幅され、強度が大きくなる。特に、フォノン・サイドバンドに相当する波長のノイズが存在する場合には、それが種 (シード光) となって増幅を受けるため散乱光の強度が大きくなり、SRS, SBSによる波長幅広がり影響が顕著になる。従って、SRS, SBSの影響を低減するためには種となるノイズを低減することが必要である。

15 そこで、上記の本発明においては、先ず複数段の光ファイバー増幅器の接続部に狭帯域フィルタ及びアイソレータを挿入することによって、Amplified Spontaneous Emission (以下、「ASE」と言う) ノイズを軽減する。これによって、SRS及びSBSを低減できる。

20 また、別の方法として複数段の光ファイバー増幅器の間にアイソレータを挿入することによってもASEを小さくできるため、SRS及びSBSの影響を低減できる。更に、複数段の光ファイバー増幅器の間に狭帯域フィルタを挿入することによってASEを小さくできると共に、狭帯域フィルタはラマン (Raman) 散乱によって散乱された光をブロックできるために、散乱光がコヒーレントに増幅されることがなくなって、S
25 RSの影響も低減される。

これらの場合に、アイソレータ又は狭帯域フィルタにより励起光の伝

播が阻止される。そこで、励起光をアイソレータ又は狭帯域フィルタの
前後の光ファイバー増幅器に伝播できるようにバイパス部材を設けてい
る。このバイパス部材では、カップリング用の波長分割多重 (Wavelength
Division Multiplexing: WDM) 素子を用いることによって、励起
5 光を効率的に使用することができる。

次に、双方向励起構造の光ファイバー増幅器においても、その接続部
に狭帯域フィルタを配置することで非線形効果による波長幅の広がり
低減される。更に、その狭帯域フィルタの両端に結合された光ファイバ
ーの端面に励起光を反射する膜を形成しておく、前方と後方との両側
10 から注入された励起光はそれぞれ反射されて逆向きに伝播して、元の光
ファイバー増幅器に戻る。これによって、上記の励起光のバイパスのた
めのWDM用の合波器等が不要になり、構成が簡略化されると共に、W
DMの挿入損失も無くなる。

次に、更に別の方法として、光変調部で変換されるパルス光の波形を、
最終的に発生する紫外光で所定の波長幅を得るためのパルス幅、即ち必
15 要な周波数幅のトランスファー・リミットで決まるパルス幅より数倍長
い幅 (例えば、2 ns から 5 ns 程度) を持つと共に、パルス過渡時間
がほぼ最大になる波形を使用する方法もある。この場合には、最終段の
光ファイバー増幅器での利得のブリーチングを利用することによって、
20 出力光のパルス幅は短くなる。

即ち、SPMによる周波数広がりとは光強度の時間変化に比例するので、
光強度の時間変化が緩やかなパルス過渡時間が長いパルスほど周波数広
がりが小さくなる。従って、パルス幅が長く、過渡時間が長いパルス
を使用することでSPMの影響を低減できる。一方、パルス幅が広いほど
25 S B S の影響が大きくなるというトレードオフがある。簡単なモデルで
は、S B S が起こり始める光強度である閾値は、パルス幅に反比例する。

しかし、SBSが最も問題となる最終段の光ファイバー増幅器では利得のブリーチングがおこるため、出力光のパルス幅は短くなり、パルス幅が広いための悪影響は軽減される。

更に、別の方法として最終段の高出力の光ファイバー増幅器から伝送用の光ファイバーへのSRSの伝播を抑えるために、その接続部に狭帯域フィルタを挿入する方法がある。その狭帯域フィルタによってASEを低減できると共にSRSの伝播が抑えられて、伝播光の波長幅の広がりが小さくなる。

また、光ファイバー増幅器として、例えばエルビウム・ドープ・光ファイバー増幅器(EDFA)を使用する場合、励起光としては(980±10)nm及び(1480nm±30)nmの光を使用できる。ところが、励起波長として、980nm帯を用いる場合、1480nm帯を用いる場合に比較して、単位長さ当たりの利得が大きくなる。従って、所望の利得を得るために必要なファイバー長を短くすることができ、ノイズの主要因であるASEを小さくできる。このため、980nm帯の励起では1480nm帯の励起に比較して、光ファイバー増幅器のノイズを低減できる。

なお、イッテルビウム(Yb)・ドープ・光ファイバー、及びエルビウムとイッテルビウムとをコ・ドープした光ファイバーの励起光としては(970±10)nmの光が使用できる。

これらの各レーザ装置においては、そのレーザ光発生部から発生するレーザ光を複数に分岐する光分岐装置(14, 16-1~16-m)を更に備え、その光増幅部(18-1~18-n)はその複数に分岐されたレーザ光のそれぞれに独立に設けられると共に、その波長変換部は、その複数の光増幅部から出力されたレーザ光の束をまとめて波長変換することが望ましい。このように光分岐装置で分岐したレーザ光に順次所

定の光路長差を付与することで、最終的に束ねられるレーザ光の空間的コヒーレンスが低減できる。また、各レーザ光は共通のレーザ光発生部から発生しているため、最終的に得られる紫外光のスペクトル線幅は狭くなっている。

- 5 更に、そのレーザ光は光変調器等によって例えば100kHz程度の高い周波数で容易に変調することができる。また、各パルス光は所定の時間間隔の例えば100個程度のパルス光の集合体である。従って、エキシマレーザ光（周波数は数kHz程度）を使用する場合に比べて、同じ照度を得るためにはパルスエネルギーを $1/1000 \sim 1/10000$ 程度にできるため、露光光源として用いた場合に、コンパクション等
10 による光学部材の透過率変動が殆ど無くなり、安定にかつ高精度に露光を行うことができる。

- 次に、本発明の波長変換部の構成については、複数の非線形光学結晶の2次高調波発生（SHG）及び和周波発生（SFG）の組み合わせによ
15 って、基本波に対して任意の整数倍の周波数（波長は整数分の1）の高調波よりなる紫外光を容易に出力することができる。

- そして、例えばレーザ光発生部で波長が $1.5\mu\text{m}$ 、特に $1.544 \sim 1.552\mu\text{m}$ に限定されたレーザ光を放射し、波長変換部でその基本波の8倍高調波の発生を行う構成によって、ArFエキシマレーザと
20 実質的に同一波長の $193 \sim 194\text{nm}$ の紫外光が得られる。また、レーザ光発生部として波長が $1.5\mu\text{m}$ 付近、特に $1.57 \sim 1.58\mu\text{m}$ に限定されたレーザ光を放射し、波長変換部でその基本波の10倍高調波の発生を行う構成によ
 って、F₂レーザと実質的に同一波長の $157 \sim 158\text{nm}$ の紫外光が得られる。同様に、例えばレーザ光発生部と
25 して波長が $1.1\mu\text{m}$ 付近、特に $1.099 \sim 1.106\mu\text{m}$ に限定されたレーザ光を放射し、波長変換部でその基本波の7倍高調波の発生を

行う構成によって、F₂ レーザと実質的に同一波長の紫外光が得られる。

そして、本発明の露光装置は、更に、そのレーザ装置からの紫外光をマスク（163）に照射する照明系（162）と、そのマスクのパターンの像を基板（166）上に投影する投影光学系（165）とを有し、
5 そのマスクのパターンを通過した紫外光でその基板を露光するものである。本発明のレーザ装置の使用によって、露光装置全体を小型化でき、かつメンテナンスが容易になる。

また、本発明の露光方法によれば、そのレーザ装置からの紫外光がその露光装置の例えばTTR（スルー・ザ・レチクル）方式のアライメント系のアライメント光として使用される。このアライメント光は実質的に連続光にできるため、アライメントが容易になる。
10

次に、本発明による第1の露光装置の製造方法は、レーザ装置からの紫外光で第1物体（163）のパターンを照明し、該第1物体のパターンを経た紫外光で第2物体（166）を露光する露光装置の製造方法であって、そのレーザ装置を、赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部（11）と、このレーザ光発生部から発生されたレーザ光を順次増幅する複数段の光ファイバー増幅器（22, 25）と、この複数段の光ファイバー増幅器の間に配置された狭帯域フィルタ（24A）及びアイソレータ（IS3）とを有する光増幅部（18）と、この光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部（20）とを所定の位置関係で配置して構成したものである。
15
20

また、本発明による第2の露光装置の製造方法は、レーザ装置からの紫外光で第1物体のパターンを照明し、該第1物体のパターンを経た紫外光で第2物体を露光する露光装置の製造方法であって、そのレーザ装置を、赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生
25

するレーザ光発生部（１１）と、このレーザ光発生部から発生されたレーザ光を増幅する複数の増幅用光ファイバー（２２，２５）と、複数の増幅用の励起光を発生する励起光発生光源（２３Ａ）と、その複数の増幅用光ファイバーの間に配置された狭帯域フィルタ（２４Ａ）又はアイソレータ（ＩＳ３）と、この狭帯域フィルタ又はアイソレータと並列にその励起光を通過させるためのバイパス部材（２１Ｂ，２１Ｃ，３０）とを有する光増幅部（１８Ａ；１８Ｂ）と、この光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部（２０）とを所定の位置関係で配置して構成したものである。

また、本発明のデバイスの製造方法は、本発明の露光装置を用いてマスクパターンを基板上に転写する工程を含むものである。

図面の簡単な説明

図１は、本発明の実施の形態の一例の紫外光発生装置を示す図である。

図２は、図１中の光増幅ユニット１８－１～１８－ｎの第１の構成例を示す図である。図３は、光増幅ユニット１８－１～１８－ｎの第２の構成例を示す図である。図４は、光増幅ユニット１８－１～１８－ｎの第３の構成例を示す図である。図５は、光増幅ユニット１８－１～１８－ｎの第４の構成例を示す図である。図６は、光増幅ユニット１８－１～１８－ｎの第５の構成例を示す図である。図７は、本発明の実施の形態の他の例の各部のレーザ光の波形を示す図である。図８において、（ａ）は図１中の波長変換部２０の第１の構成例を示す図、（ｂ）はその波長変換部２０の第２の構成例を示す図である。図９において、（ａ）は波長変換部２０の第３の構成例を示す図、（ｂ）は波長変換部２０の第４の構成例を示す図である。図１０は、上記の実施の形態の紫外光発生装置を適用した露光装置の一例を示す構成図である。図１１は、上記の実

施の形態の紫外光発生装置を適用した露光装置の他の例を示す構成図である。

発明を実施するための最良の形態

5 以下、本発明の好適な実施の形態の一例につき図面を参照して説明する。本例は、ステッパやステップ・アンド・スキャン方式等の投影露光装置、又はアライメントや各種検査用の光源として使用できる紫外光発生装置に本発明を適用したものである。

10 図1(a)は、本例の紫外光発生装置を示し、この図1(a)において、レーザ光発生部としての単一波長発振レーザ11からスペクトル幅の狭い単一波長の連続波(CW)よりなる波長 $1.544\mu\text{m}$ のレーザ光LB1が発生する。このレーザ光LB1は、逆向きの光を阻止するためのアイソレータIS1を介して光変調器としての光変調素子12に入射し、ここでパルス光のレーザ光LB2に変換されて光分岐増幅部4に入射する。

15 光分岐増幅部4に入射したレーザ光LB2は、先ず前段の光増幅部としての光ファイバー増幅器13を通過して増幅された後、アイソレータIS2を介して第1の光分岐素子としての平面導波路型のスプリッタ14に入射して、 m 本のほぼ同一強度のレーザ光に分岐される。 m は2以上の整数であり、本例では $m=4$ である。光ファイバー増幅器13としては、単一波長発振レーザ11から発生されるレーザ光LB1と同じ波長域(本例では $1.544\mu\text{m}$ 付近)の光を増幅するために、エルビウム・ドープ・光ファイバー増幅器(Erbium-Doped Fiber Amplifier: EDFA)が使用されている。なお、光ファイバー増幅器13には不図示

20 のカップリング用の波長分割多重素子を介して不図示の励起用の半導体レーザからの波長 980nm の励起光が供給されている。エルビウム・

25

ドープ・光ファイバー増幅器 (EDFA) には (980 ± 10) nm 又は $(1480 \text{ nm} \pm 30 \text{ nm})$ の励起光が使用できる。しかしながら、非線形効果による波長の広がり防止するためには、励起光として波長 (980 ± 10) nm のレーザ光を使用して、ファイバー長を短くすることが望ましい。これによって、更に 1480 nm 帯の光を励起光に使用する場合に比べて ASE (Amplified Spontaneous Emission) による光ファイバー増幅器 13 のノイズを小さくできる点でも望ましい。これは後段の光ファイバー増幅器についても同様である。

スプリッタ 14 から射出された m 本のレーザ光は、互いに異なる長さの光ファイバー 15-1, 15-2, ..., 15- m を介してそれぞれ第 2 の光分岐素子としての平面導波路型のスプリッタ 16-1, 16-2, ..., 16- m に入射して、それぞれほぼ同一強度の n 本のレーザ光に分岐される。 n は 2 以上の整数であり、本例では $n=32$ である。第 1 の光分割素子 (14) 及び第 2 の光分割素子 (16-1~16- m) が本発明の一実施形態における光分岐装置に対応する。その結果、単一波長発振レーザ 11 から射出されるレーザ光 LB1 は、全体として $n \cdot m$ 本 (本例では 128 本) のレーザ光に分割される。

そして、スプリッタ 16-1 から射出された n 本のレーザ光 LB3 は、互いに異なる長さの光ファイバー 17-1, 17-2, ..., 17- n を介してそれぞれ後段の光増幅部としての光増幅ユニット 18-1, 18-2, ..., 18- n に入射して増幅される。光増幅ユニット 18-1~18- n は、単一波長発振レーザ 11 から発生されるレーザ光 LB1 と同じ波長域 (本例では $1.544 \mu\text{m}$ 付近) の光を増幅する。同様に他のスプリッタ 16-2~16- m から射出された n 本のレーザ光も、それぞれ互いに異なる長さの光ファイバー 17-1~17- n を介して後段の光増幅部としての光増幅ユニット 18-1~18- n に入射して増

幅される。

m組の光増幅ユニット18-1～18-nで増幅されたレーザ光は、それぞれ光増幅ユニット18-1～18-n内の所定の物質がドーブされた光ファイバー（後述）の射出端の延長部を伝播し、これらの延長部
5 光ファイバー・バンドル19を構成する。光ファイバー・バンドル19を構成するm組のn本の光ファイバーの延長部の長さは互いにほぼ同一である。但し、光ファイバー・バンドル19をm・n本の互いに同じ長さの無ドーブの光ファイバーを束ねて形成すると共に、光増幅ユニット18-1～18-nで増幅されたレーザ光をそれぞれ対応する無ドー
10 プの光ファイバーに導いてもよい。光ファイバー増幅器13から光ファイバー・バンドル19までの部材より光分岐増幅部4が構成されている。

光ファイバー・バンドル19から射出されたレーザ光LB4は、非線形光学素子を有する波長変換部20に入射して紫外光よりなるレーザ光LB5に変換され、このレーザ光LB5が露光光、アライメント光、又は検査用の光として外部に射出される。m組の光増幅ユニット18-1
15 ～18-nがそれぞれ本発明の光増幅部に対応しているが、この光増幅部に光ファイバー・バンドル19の光ファイバーを含める場合もある。

また、光ファイバー・バンドル19の出力端19aは、図1（b）に示すように、m・n本（本例では128本）の光ファイバーを密着するように、かつ外形が円形になるように束ねている。実際には、その出力
20 端19aの形状及び束ねる光ファイバーの数は、後段の波長変換部20の構成、及び本例の紫外光発生装置の使用条件等に応じて定められる。光ファイバー・バンドル19を構成する各光ファイバーのクラッド直径は125μm程度であることから、128本を円形に束ねた場合の光
25 ファイバー・バンドル19の出力端19aの直径d1は、約2mm以下とすることができる。なお、光分岐増幅部4は図1の構成に限られるもの

ではなく、例えば光分岐装置として時分割型光分岐素子（Time Division Multiplexer）などを用いてもよい。

また、本例の波長変換部20では、入射するレーザ光LB4を8倍高調波（波長は $1/8$ ）、又は10倍高調波（波長は $1/10$ ）よりなるレーザ光LB5に変換する。単一波長発振レーザ11から射出されるレーザ光LB1の波長は $1.544\mu\text{m}$ であるため、8倍高調波の波長はArFエキシマレーザと同じ 193nm となり、10倍高調波の波長はF₂レーザ（フッ素レーザ）の波長（ 157nm ）とほぼ同じ 154nm となる。なお、レーザ光LB5の波長をよりF₂レーザ光の波長に近付けたい場合には、波長変換部20で10倍高調波を生成すると共に、単一波長発振レーザ11では波長 $1.57\mu\text{m}$ のレーザ光を発生すればよい。

実用的には、単一波長発振レーザ11の発振波長を $1.544\sim 1.552\mu\text{m}$ 程度に規定して、8倍波に変換することにより、ArFエキシマレーザと実質的に同一波長（ $193\sim 194\text{nm}$ ）の紫外光が得られる。そして、単一波長発振レーザ11の発振波長を $1.57\sim 1.58\mu\text{m}$ 程度に規定して、10倍波に変換することによってF₂レーザと実質的に同一波長（ $157\sim 158\text{nm}$ ）の紫外光が得られる。従って、これらの紫外光発生装置をそれぞれArFエキシマレーザ光源、及びF₂レーザ光源に代わる安価でメンテナンスの容易な光源として使用することができる。

なお、最終的にArFエキシマレーザ、又はF₂レーザ等に近い波長域の紫外光を得る代わりに、例えば製造対象の半導体デバイス等のパターンルールより最適な露光波長（例えば 160nm 等）を決定し、この理論的に最適な波長の紫外光を得るように単一波長発振レーザ11の発振波長や波長変換部20における高調波の倍率を決定するようにしても

よい。即ち、波長変換部 20 から発生する紫外光はその波長が任意（一例としては 200 nm 程度以下）でよいし、8 倍波及び 10 倍波以外でもよく、波長変換部 20 の構成は任意で構わない。

以下、本実施形態についてより詳細に説明する。図 1 (a) において、
5 単一波長で発振する単一波長発振レーザ 11 としては、例えば発振波長 1.544 μ m、連続波出力（以下、「CW 出力」ともいう）で出力が 20 mW の InGaAsP 構造の DFB (Distributed feedback: 分布帰還型) 半導体レーザを用いる。ここで DFB 半導体レーザとは、縦モード選択性の低いファブリーペロー型共振器の代わりに、回折格子を半
10 導体レーザ内に形成したもので、どのような状況下であっても単一縦モード発振を行うように構成されている。DFB 半導体レーザは、基本的に単一縦モード発振をすることから、その発振スペクトル線幅は 0.01 pm 以下に抑えられる。なお、単一波長発振レーザ 11 としては、同様の波長領域で狭帯域化されたレーザ光を発生する光源、例えばエルビウム (Er) ・ドープ・ファイバー・レーザ等をも使用することができる。
15

更に、本例の紫外光発生装置の出力波長は用途に応じて特定波長に固定することが望ましい。そのため、マスター発振器 (Master Oscillator) としての単一波長発振レーザ 11 の発振波長を一定波長に制御するための発振波長制御装置を設けている。本例のように単一波長発振レー
20 ザ 11 として DFB 半導体レーザを用いる場合には、DFB 半導体レーザの温度制御を行うことにより発振波長を制御することができ、この方法により発振波長を更に安定化して一定の波長に制御したり、あるいは出力波長を微調整することができる。

25 通常、DFB 半導体レーザなどはヒートシンクの上に設けられ、これらが筐体内に収納されている。そこで本例では、単一波長発振レーザ 1

1 (D F B半導体レーザなど)に付設されるヒートシンクに温度調整部
5 (例えばヒータ等の加熱素子、ペルチェ素子等の吸熱素子、及びサーミスタ等の温度検出素子よりなる)を固定し、その温度調整部5の動作をコンピュータよりなる制御部1が制御して、そのヒートシンク、ひいては単一波長発振レーザ11の温度を高精度に制御する。ここで、D F B半導体レーザなどではその温度を0.001℃単位で制御することが可能である。また、制御部1は、ドライバ2を介して単一波長発振レーザ11を駆動するための電力(D F B半導体レーザでは駆動電流)を高精度に制御する。

10 D F B半導体レーザの発振波長は0.1nm/℃程度の温度依存性を持つため、そのD F B半導体レーザの温度を例えば1℃変化させると、基本波(波長1544nm)ではその波長が0.1nm変化する。従って、8倍波(193nm)ではその波長が0.0125nm変化し、10倍波(157nm)ではその波長が0.01nm変化することになる。
15 なお、レーザ光LB5を露光装置に使用する場合には、例えば露光装置が設置される環境の大気圧差による結像特性の誤差、又は結像特性の変動による誤差等を補正するために、その中心波長に対して±20pm程度変化できることが望ましい。このためには、D F B半導体レーザの温度を8倍波では±1.6℃程度、10倍波では±2℃程度変化させれば
20 よく、これは実用的である。

そして、この発振波長を所定の波長に制御する際のフィードバック制御のモニター波長としては、D F B半導体レーザの発振波長、あるいは後述する波長変換部20内での波長変換後の高調波出力(2倍波、3倍波、4倍波等)の内から所望の波長制御を行うに当たって必要な感度を与え、かつ最もモニターしやすい波長を選択すればよい。単一波長発振
25 レーザ11として例えば発振波長1.51~1.59μmのD F B半導

体レーザを使用する場合に、この発振レーザ光の3倍波は503nm～530nmの波長になるが、この波長帯はヨウ素分子の吸収線が密に存在する波長域に該当しており、ヨウ素分子の適切な吸収線を選んでその波長にロックすることにより精密な発振波長制御を行うことが可能である。そこで、本例では波長変換部20内の所定の高調波（望ましくは3倍波）をヨウ素分子の適切な吸収線（基準波長）と比較し、その波長のずれ量を制御部1にフィードバックし、制御部1ではそのずれ量が所定の一定値になるように単一波長発振レーザ11の温度を制御する。逆に、制御部1では、その単一波長発振レーザ11の発振波長を積極的に変化させてその出力波長を調整可能にしてもよい。

本例の紫外光発生装置を例えば露光装置の露光光源に適用する場合、前者によれば、波長変動による投影光学系の収差の発生、又はその変動が防止され、パターン転写中にその像特性（像質などの光学的特性）が変化することがなくなる。また、後者によれば、露光装置が組立、調整される製造現場と露光装置の設置場所（納入先）との標高差や気圧差、更には環境（クリーンルーム内の雰囲気）の違いなどに応じて生じる投影光学系の結像特性（収差など）の変動を相殺でき、納入先で露光装置の立ち上げに要する時間を短縮することが可能になる。更に後者によれば、露光装置の稼働中に、露光用照明光の照射、大気圧変化、及び照明光学系によるレチクルの照明条件（即ち、照明光学系の瞳面上での露光用照明光の光量分布）の変更などに起因して生じる投影光学系の収差、投影倍率、及び焦点位置などの変動も相殺でき、常に最良の結像状態でパターン像を基板上に転写することが可能となる。

単一波長発振レーザ11から出力される連続光よりなるレーザ光LB1は、例えば電気光学光変調素子や音響光学光変調素子などの光変調素子12を用いて、パルス光よりなるレーザ光LB2に変換される。光変

調素子 1 2 の動作は、制御部 1 によってドライバ 3 を介して制御されている。本構成例では一例として、この光変調素子 1 2 によってパルス幅 1 n s、繰り返し周波数 1 0 0 k H z（パルス周期 1 0 μ s）のパルス光に変調させた場合について説明を行う。この様な光変調を行った結果、
5 光変調素子 1 2 から出力されるパルス光のピーク出力は 2 0 mW、平均出力は 2 μ Wとなる。ここでは、光変調素子 1 2 の挿入による損失がないものとしたが、実際にはその挿入損失がある。例えば損失が - 3 d B である場合、パルス光のピーク出力は 1 0 mW、平均出力は 1 μ Wとなる。

10 なお、光変調素子 1 2 として電気光学変調素子を用いる場合には、屈折率の時間変化に伴うチャープによる半導体レーザ出力の波長広がり小さくなるように、チャープ補正を行った電極構造を持つ電気光学変調素子（例えば二電極型変調器）を用いることが好ましい。また、繰り返し周波数を 1 0 0 k H z 程度以上に設定することにより、後述する光増幅ユニット 1 8 - 1 ~ 1 8 - n 内の光ファイバー増幅器において A S E
15 (Amplified Spontaneous Emission: 自然放出光) ノイズの影響による増幅率低下を阻止することができる。更に、最終的に出力される紫外光の照度が従来のエキシマレーザ光（パルス周波数は数 k H z 程度）と同程度でよい場合には、本例のようにパルス周波数を高め、各パルス光を
20 例えば 1 2 8 個の遅延したパルス光の集合体とすることによって、各パルス当たりのエネルギーを $1 / 1 0 0 0 \sim 1 / 1 0 0 0 0$ 程度に小さくすることができ、コンパクション等による光学部材（レンズ等）の屈折率変動等を小さくすることができる。従って、そのような変調器構成とすることが望ましい。

25 更に、半導体レーザなどではその電流制御を行うことで、出力光をパルス発振させることができる。このため、本例では単一波長発振レーザ

1 1 (DFB半導体レーザなど)の電力制御と光変調素子1 2とを併用してパルス光を発生させることが好ましい。そこで、単一波長発振レーザ1 1の電流制御によって、例えば1 0～2 0 n s程度のパルス幅を有するパルス光を発振させると共に、光変調素子1 2によってそのパルス光からその一部のみを切り出す、即ち本例ではパルス幅が1 n sのパルス光に変調する。

これにより、光変調素子1 2のみを用いる場合に比べて、パルス幅が狭いパルス光を容易に発生させることが可能になると共に、パルス光の発振間隔や発振の開始及びその停止などをより簡単に制御することが可能になる。特に、光変調素子1 2のみを用いてパルス光をオフの状態にしてもその消光比が充分でない場合には、単一波長発振レーザ1 1の電力制御を併用することが望ましい。

このようにして得たパルス光出力を、初段のエルビウム・ドープの光ファイバー増幅器1 3に接続し、3 5 d B (3 1 6 2 倍)の光増幅を行う。このときパルス光は、ピーク出力約6 3 W、平均出力約6 . 3 mWとなる。なお、この光ファイバー増幅器1 3の代わりに複数段の光ファイバー増幅器を使用してもよい。

その初段の光ファイバー増幅器1 3の出力を、スプリッタ1 4でまずチャンネル0～3の4個の出力(本例では $m=4$)に並列分割する。このチャンネル0～3の各出力を、各々長さの異なる光ファイバー1 5-1～1 5-4に接続することにより、各光ファイバーからの出力光には、光ファイバー長に対応した遅延時間が与えられる。例えば本実施形態では、光ファイバー中の光の伝搬速度を 2×10^8 m/sであるとし、チャンネル0、1、2、3にそれぞれ0 . 1 m、1 9 . 3 m、3 8 . 5 m、5 7 . 7 mの長さの光ファイバー1 5-1～1 5-4を接続する。この場合、各光ファイバーの出口での隣り合うチャンネル間の光の遅延は9 6 n sと

なる。なおここでは、この様に光を遅延させる目的で使用する光ファイバー 15-1～15-4 を、便宜的に「遅延ファイバー」と呼ぶ。

次に、その4本の遅延ファイバーの出力を、4個のスプリッタ 16-1～16-4 で更に n 個（本例では $n=32$ ）の出力に並列分割（各スプリッタでチャンネル 0～31）し、合計 4×32 個（=128 個）のチャンネルに分割する。そして、各スプリッタ 16-1～16-4 のチャンネル 0～31 の出力端に再び互いに長さの異なる光ファイバー（遅延ファイバー） 17-1～17-32 を接続して、隣接するチャンネル間に $3n$ s の遅延時間を与える。これによって、チャンネル 31 の出力には、 $93n$ s の遅延時間が与えられる。一方、第1から第4までの各スプリッタ 16-1～16-4 間には、前記のように遅延ファイバーによって、各スプリッタの入力時点で各々 $96n$ s の遅延時間が与えられている。この結果、全体で総計 128 チャンネルの出力端で、隣り合うチャンネル間に $3n$ s の遅延時間を持つパルス光が得られる。

この結果、本例では光ファイバー・バンドル 19 から射出されるレーザー光 LB4 の空間的コヒーレンスが、単に単一波長発振レーザー 11 から射出されるレーザー光 LB1 の断面形状を拡大した場合に比べてほぼ $1/128$ のオーダーで低下する。従って、最終的に得られるレーザー光 LB5 を露光光として用いた場合に生じるスペックルの量は極めて少ない利点がある。

以上の分岐及び遅延により、総計 128 チャンネルの出力端では、隣り合うチャンネル間で $3n$ s の遅延時間を持つパルス光が得られるが、このとき各々の出力端で観測される光パルスは、光変調素子 12 によって変調されたパルス光と同じ 100 kHz （パルス周期 $10\text{ }\mu\text{s}$ ）である。

従って、レーザー光発生部全体として見ると、128 パルスが $3n$ s 間隔で発生した後、 $9.62\text{ }\mu\text{s}$ の間隔を置いて次のパルス列が発生すると

いう繰り返しが100kHzで行われる。

なお本実施形態では、分割数を128とし、また遅延ファイバーとして短いものを用いた例について説明した。このため各パルス列の間に9.62 μ sの無発光の間隔が生じたが、分割数m, nを増加させる、又は
5 遅延ファイバーをより長くして適切な長さとする、あるいはこれらを組み合わせる用いることにより、パルス間隔を完全な等間隔とすることも可能である。

以上より本例のスプリッタ14、光ファイバー15-1~15-m、
スプリッタ16-1~16-m、及びm組の光ファイバー17-1~1
10 7-nは、全体として時分割多重（Time Division Multiplexing: TDM）手段を構成しているともみなすことができる。なお、その本例では時分割多重手段を2段のスプリッタによって構成しているが、それを3段以上のスプリッタで構成してもよく、又は分割数は少なくなるが1段のスプリッタのみで構成してもよい。また、本例のスプリッタ14、1
15 6-1~16-mは平板導波路型であるが、それ以外に例えばファイバースプリッタや、部分透過鏡を用いたビームスプリッタ等も使用することができる。

また、本例では光変調素子12に印加するドライブ用電圧パルスのタイミングを制御することによって、光源（パルス光）の発振タイミング、
20 即ち繰り返し波数fを調整することができる。更に、この発振タイミングの変更に伴ってパルス光の出力が変動し得る場合には、光変調素子12に印加するドライブ用電圧パルスの大きさも同時に調整してその出力変動を補償するようにしてもよい。このとき、単一波長発振レーザ11の発振制御のみ、あるいは前述した光変調素子12の制御との併用によ
25 ってそのパルス光の出力変動を補償するようにしても良い。

図1（a）において、m組の遅延ファイバー（光ファイバー17-1

～17-n)を通過したレーザ光はそれぞれ光増幅ユニット18-1～18-nに入射して増幅される。本例の光増幅ユニット18-1～18-nは光ファイバー増幅器を備えているが、特に最終段の光ファイバー増幅器のように、強度の大きな光が光ファイバー中を伝播する場合には、
5 光ファイバーの非線形効果に起因したSPM (Self Phase Modulation)、SRS (Stimulated Raman Scattering)、及びSBS (Stimulated Brillouin Scattering)等の影響で伝播光の波長幅が広がってしまう。そこで、以下の実施の形態では、その非線形効果の影響を軽減して波長幅の広がりを抑えるための構成例を示す。以下では、光増幅ユニット18-1として使用できる光増幅ユニットのいくつかの構成例につ
10 き説明するが、これらは他の光増幅ユニット18-2～18-nとしても同様に使用することができる。

図2は、第1の構成例の光増幅ユニット18を示し、この図2において、光増幅ユニット18は基本的に2段のそれぞれエルビウム・ドープ
15 ・光ファイバー増幅器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier: EDFA) よりなる光ファイバー増幅器22及び25を接続して構成されている。光ファイバー増幅器22、25は「増幅用光ファイバー」とも呼ぶことができる。そして、1段目の光ファイバー増幅器22の両端部には、励起光をカップリングするための波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) 素子 (以下、「WDM素子」と言う) 21A及び2
20 1Bが接続され、WDM素子21A及び21Bによってそれぞれ励起光源としての半導体レーザ23Aからの励起光EL1及び半導体レーザ23Bからの励起光が、光ファイバー増幅器22に前後から供給されている。同様に、2段目の光ファイバー増幅器25の両端部にも、カップ
25 リング用のWDM素子21C及び21Dが接続され、WDM素子21C及び21Dによってそれぞれ半導体レーザ23C及び23Dからの励起光

が光ファイバー増幅器 2 5 に前後から供給されている。即ち、光ファイバー増幅器 2 2, 2 5 は共に双方向励起型である。

光ファイバー増幅器 2 2, 2 5 はそれぞれ入射するレーザ光 L B 3 (本例では波長 $1.544\ \mu\text{m}$) の波長を含む例えば約 $1.53\sim 1.56\ \mu\text{m}$ 程度の波長域の光を増幅する。また、光ファイバー増幅器 2 2, 2 5 の境界部である WDM 素子 2 1 B と WDM 素子 2 1 C との間に、狭帯域フィルタ 2 4 A 及び戻り光を阻止するためのアイソレータ I S 3 が配置されている。狭帯域フィルタ 2 4 A としては多層膜フィルタ、又はファイバー・ブラッグ・グレーティング (Fiber Bragg Grating) が使用できる。

本例において、図 1 (a) の光ファイバー 1 7 - 1 からのレーザ光 L B 3 は、WDM 素子 2 1 A を介して増幅用光ファイバー 2 2 に入射して増幅される。この増幅用光ファイバー 2 2 で増幅されたレーザ光 L B 3 は、WDM 素子 2 1 B、狭帯域フィルタ 2 4 A、アイソレータ I S 3、及び WDM 素子 2 1 C を介して増幅用光ファイバー 2 5 に入射して再び増幅される。増幅されたレーザ光 L B 3 は、WDM 素子 2 1 D を介して図 1 (a) の光ファイバー・バンドル 1 9 を構成する 1 本の光ファイバー (増幅用光ファイバー 2 5 の射出端の延長部でもよい) を伝播する。

この場合、2 段の増幅用光ファイバー 2 2 及び 2 5 による合計の増幅利得は一例として約 $46\ \text{dB}$ (39810 倍) である。そして、図 1 (b) のスプリッタ 1 6 - 1 \sim 1 6 - m から出力される全チャネル数 ($m \cdot n$ 個) を 128 個として、各チャネルの平均出力を約 $50\ \mu\text{W}$ とすると、全チャネル合計での平均出力は約 $6.4\ \text{mW}$ となる。その各チャネルのレーザ光をそれぞれ約 $46\ \text{dB}$ で増幅すると、各光増幅ユニット 1 8 - 1 \sim 1 8 - n から出力されるレーザ光の平均出力はそれぞれ約 $2\ \text{W}$ となる。これをパルス幅 $1\ \text{ns}$ 、パルス周波数 $100\ \text{kHz}$ でパル

ス化したものとする、各レーザ光のピーク出力は20 kWとなる。また、光ファイバー・バンドル19から出力されるレーザ光LB4の平均出力は約256 Wとなる。

ここでは、図1(a)のスプリッタ14、16-1~16-mでの結合損失を考慮していないが、その結合損失がある場合にはその損失分だけ光ファイバー増幅器22、25の少なくとも1つの増幅利得を上げる
5 ことにより、各チャネルのレーザ光の出力を上記の値（例えばピーク出力20 kWなど）に均一化することができる。なお、図2の光ファイバー増幅器22及び25による増幅利得を変化させることで、図1(a)
10 の単一波長発振レーザ11の出力（基本波の出力）を前述した値よりも大きくしたり、あるいは小さくしたりすることができる。

図2の構成例において、狭帯域フィルタ24Aは、図1(a)の光ファイバー増幅器13及び図2の光ファイバー増幅器22でそれぞれ発生するASE（Amplified Spontaneous Emission）光をカットし、かつ図
15 1(a)の単一波長発振レーザ11から出力されるレーザ光（波長幅は1 pm程度以下）を透過させることで、透過光の波長幅を実質的に狭帯化するものである。これにより、ASE光が後段の光ファイバー増幅器25に入射してレーザ光の増幅利得を低下させるのを防止することができる。ここで、狭帯域フィルタ24Aはその透過波長幅が1 pm程度で
20 あることが好ましいが、ASE光の波長幅は数十nm程度であるので、現時点で得られる透過波長幅が100 pm程度の狭帯域フィルタを用いても実用上問題がない程度にASE光をカットすることができる。

また、図1(a)の単一波長発振レーザ11の出力波長を積極的に変化させる場合、その出力波長に応じて狭帯域フィルタ24Aを交換する
25 ようにしてもよいが、その出力波長の可変幅（露光装置では一例として前述した±20 pm程度）に応じた透過波長幅（可変幅と同程度以上）

を持つ狭帯域フィルタを用いることが好ましい。

また、アイソレータ I S 3 によって戻り光の影響が低減される。更に、
図 2 の構成例においては、狭帯域フィルタ 2 4 A 及びアイソレータ I S
3 を用いることによって A S E ノイズが低減しているために、最終段の
5 光ファイバー増幅器 2 5 の他の非線形効果である S R S (Stimulated R
aman Scattering) 及び S B S (Stimulated Brillouin Scattering) の
影響も低減されるため、波長幅の広がりが増幅される。光増幅ユニット
1 8 は例えば 3 段以上の光ファイバー増幅器を接続して構成することも
可能であるが、この場合にも隣接する 2 つの光ファイバー増幅器の境界
10 部の全てに狭帯域フィルタ 2 4 A 及びアイソレータ I S 3 を挿入するこ
とが望ましい。

また、本例では多数の光増幅ユニット 1 8 の出力光を束ねて使用する
ため、各出力光の強度の分布を均一化することが望ましい。このために
は、例えば WDM 素子 2 1 D から射出されるレーザ光 L B 3 の一部を分
15 離し、この分離された光を光電変換することによって、射出されるレー
ザ光 L B 3 の光量をモニタし、この光量が全部の光増幅ユニット 1 8 で
ほぼ均一になるように、各光増幅ユニット 1 8 における励起光源 (半導
体レーザ 2 3 A ~ 2 3 D) の出力を制御すればよい。

次に、図 3 を参照して第 2 の構成例の光増幅ユニット 1 8 A につき説
20 明する。図 3 において図 2 に対応する部分には同一符号を付してその詳
細説明を省略する。図 3 において、光増幅ユニット 1 8 A も 2 段の光フ
ァイバー増幅器 2 2 及び 2 5 を接続して構成され、前段の光ファイバー
増幅器 2 2 には WDM 素子 2 1 A を介して前方から半導体レーザ 2 3 A
からの励起光 E L 1 が供給されている。また、光ファイバー増幅器 2 2
25 から光ファイバー増幅器 2 5 にかけて順次 WDM 素子 2 1 B、アイソレ
ータ I S 3、及び WDM 素子 2 1 C が接続され、カップリング用の W D

M素子 2 1 B と 2 1 C との間にバイパス用の光ファイバー 3 0 が接続されている。

本例では、入射したレーザ光 L B 3 は、光ファイバー増幅器 2 2 で増幅された後、アイソレータ I S 3 を通過して光ファイバー増幅器 2 5 で増幅される。この際に、光ファイバー増幅器 2 2 を通過した励起光 E L 1 は、バイパス用の光ファイバー 3 0 を介して後段の光ファイバー増幅器 2 5 を通過するため、励起光源を少なくした簡単な構成でありながら光ファイバー増幅器 2 5 でも高い増幅利得が得られる。また、アイソレータ I S 3 の使用によって A S E を小さくできるため、S R S 及び S B S の影響も低減される。

次に、図 4 を参照して第 3 の構成例の光増幅ユニット 1 8 B につき説明する。図 4 において図 3 に対応する部分には同一符号を付してその詳細説明を省略する。図 4 の光増幅ユニット 1 8 B は、図 3 の光増幅ユニット 1 8 A において、2 段の光ファイバー増幅器 2 2, 2 5 の間のアイソレータ I S 3 を狭帯域フィルタ 2 4 A で置き換えたものである。この構成でも A S E を小さくすることができる。更に、狭帯域フィルタ 2 4 A は光ファイバー中でラマン散乱によって散乱された光をブロックするため、散乱光がコヒーレントに増幅されることが阻止されて、S R S の影響が低減される。この例でも、バイパス用の光ファイバー 3 0 を介して励起光 E L 1 が増幅用光ファイバー 2 5 にも供給されている。また、図 4 の狭帯域フィルタ 2 4 A としては、ノイズを低減するために、特に多層膜フィルタ、又はファイバー・ブラッグ・グレーティングが望ましい。

次に、図 5 を参照して第 4 の構成例の光増幅ユニット 1 8 C につき説明する。図 5 において図 2 に対応する部分には同一符号を付してその詳細説明を省略する。図 5 の光増幅ユニット 1 8 C は、図 2 の光増幅ユニ

ット18において、WDM素子21B、21C、励起用の半導体レーザ
23B、23C、及びアイソレータIS3を省いたものである。更に、
図5において、狭帯域フィルタ24Aの両端面24Aa、24Abに結
合された光ファイバーの端面には、それぞれ半導体レーザ23Aからの
励起光EL1及び半導体レーザ23Dからの励起光EL4を反射する高
5 反射膜がコーティングされている。本例の光ファイバー増幅器22、2
5はエルビウム・ドープ・光ファイバーであるため、励起光EL1及び
EL4としては波長980nmのレーザ光が使用される。そのため、狭
帯域フィルタの両端に結合された光ファイバーの端面にはそれぞれ98
10 0nmの光に対する高反射膜がコーティングされている。

この構成例では、入射したレーザ光LB3は、光ファイバー増幅器2
2から狭帯域フィルタ24Aを通過して更に光ファイバー増幅器25を
通過する。また、一方の励起光EL1は前方から光ファイバー増幅器2
2を通過して励起を行った後、狭帯域フィルタ24Aの面24Aaで反
15 射されて再び光ファイバー増幅器22を励起し、他方の励起光EL4は
後方から光ファイバー増幅器25を通過して励起を行った後、面24A
bで反射されて再び光ファイバー増幅器25を励起するため、光ファイ
バー増幅器22、25ではそれぞれ高い増幅利得が得られる。

この際に、狭帯域フィルタ24Aの使用によってASEが小さくなり、
20 SRSの影響が低減されている。更に、図5の構成例では、図4の構成
例と比べてバイパス用のWDM素子21B、21Cを挿入する必要が無
くなり、構成が簡素化できると共に、WDM素子の挿入損失も無くなっ
ている。

次に、図6を参照して第5の構成例の光増幅ユニット18Dにつき説
25 明する。図6において図2に対応する部分には同一符号を付してその詳
細説明を省略する。図6の光増幅ユニット18Dにおいて、光ファイバ

一増幅器 2 5 の前後にカップリング用の WDM 素子 2 1 C、及び狭帯域フィルタ 2 4 A が接続され、WDM 素子 2 1 C を介して半導体レーザ 2 3 C からの励起光 E L 3 が光ファイバー増幅器 2 5 に供給されている。また、狭帯域フィルタ 2 4 A はカップリング用の波長分割多重 (Wavele
5 ngth Division Multiplexing: WDM) 素子を兼用しており、狭帯域フ
ィルタ 2 4 A を介して半導体レーザ 2 3 D からの励起光 E L 4 が光ファ
イバー増幅器 2 5 に供給されている。そして、本例では狭帯域フィルタ
2 4 A の射出端が図 1 (a) の光ファイバー・バンドル 1 9 を構成する
1 本の無ドープの光ファイバー 2 6 に接続されている。なお、不図示で
10 あるが、WDM 素子 2 1 C の前段には図 2 の光ファイバー増幅器 2 2 及
びこの励起用の部材が接続されている。

図 6 において、入射したレーザ光 L B 3 は、光ファイバー増幅器 2 5
で増幅された後、狭帯域フィルタ 2 4 A を介して光ファイバー 2 6 を伝
播する。この際に、狭帯域フィルタ 2 4 A は WDM 素子を兼用している
15 ため、構成が簡素化されている。更に、狭帯域フィルタ 2 4 A の使用に
よって無ドープの光ファイバー 2 6 内での S R S (Stimulated Raman S
cattering) の影響が軽減されるため、全体として波長幅の広がりが増
制される。

次に、本発明の実施の形態の他の例につき図 1、図 2 及び図 7 を参照
20 して説明する。上記の実施の形態では、図 1 (a) の光変調素子 1 2 か
ら出力されるレーザ光のパルス幅は 1 n s 程度に設定されている。この
ようにパルス幅が短い場合に、ピーク出力を高くすると、特に後段の光
ファイバー増幅器において S P M (Self Phase Modulation) による周
波数広がりが大きくなる恐れがある。そこで、本例では、光変調素子 1
25 2 における出力パルスの幅を、必要な周波数幅のトランスファー・リミ
ットで決まるパルス幅 (本例では 1 n s 程度) の数倍、例えば 2 n s ~

5 ns 程度に設定すると共に、パルス波形をパルス過渡時間が最大になるようにする。

図 7 は、本例の各部のパルス波形の一例を示し、図 1 (a) の光変調素子 12 から出力されるレーザ光 LB2 の時間 t に対する強度変化は、
5 図 7 (b) の実線の波形 28A のようになる。この波形 28A のパルス幅 Δt_A は、所望のレーザ光の周波数幅のトランスファー・リミットで決まる点線で示す波形 28B のパルス幅 Δt_B の 2 倍程度に設定されている。この場合に、図 1 (a) の単一波長発振レーザ 11 から出力されるレーザ光 LB1 は、図 7 (a) の実線で示すように CW 波でもよいが、
10 2 点鎖線の波形 27 で示すようにパルス幅 Δt_A よりも広い幅のパルス光としておくことによって、レーザ光の利用効率を高めることができる。

また、本例の図 1 (a) の光増幅ユニット 18-1 として図 2 の光増幅ユニット 18 が使用されるものとする、上記のようにレーザ光 LB2 のパルス幅が広くなると、特に最終段の光ファイバー増幅器 25 において SPM の影響が低減される反面で、SBS (Stimulated Brillouin Scattering) の影響が大きくなる。ところが、その最終段の光ファイバー増幅器 25 では利得のブリーチングが起こるために、光増幅ユニット 18 から出力されるレーザ光 LB3 のパルス幅は、図 7 (c) の実線の波形 29A で示すように、レーザ光 LB2 の波形にそのまま対応する点線の波形 29B に比べて短くなる。従って、光変調素子 12 でパルス幅を広くしたことの悪影響は軽減され、全体として最終的に出力される紫外光の波長幅を狭くすることができる。

なお、上記の実施の形態では、単一波長発振レーザ 11 として発振波長が $1.544 \mu\text{m}$ 程度のレーザ光源が使用されているが、その代わりに発振波長 $1.099 \sim 1.106 \mu\text{m}$ 程度のレーザ光源を使用してもよい。このようなレーザ光源としては、DFB 半導体レーザあるいはイ

ッテルビウム (Yb) ・ ドープ ・ ファイバーレーザが使用できる。この場合には、後段の光増幅部中の光ファイバー増幅器としては、その波長を含む 990 ~ 1200 nm 程度の波長域で増幅を行うイッテルビウム (Yb) ・ ドープ ・ 光ファイバー (YDFA) を使用すればよい。この
5 場合には、図 1 (b) の波長変換部 20 において、7 倍波を出力することによって、F₂ レーザと実質的に同一の波長 157 ~ 158 nm の紫外光が得られる。実用的には、発振波長を 1.1 μ m 程度とすることで、F₂ レーザとほぼ同一波長の紫外光が得られる。

更には、単一波長発振レーザ 11 での発振波長を 990 nm 付近として、波長変換部 20 で基本波の 4 倍波を出力するようにしてもよい。これによって、KrF エキシマレーザと同一の波長 248 nm の紫外光を得ることが可能である。

なお、上記の実施形態における最終段の高ピーク出力の光ファイバー増幅器 (例えば図 2 の光増幅ユニット 18 中の光ファイバー増幅器 25)
15 においては、ファイバー中での非線形効果による増幅光のスペクトル幅の増加を避けるため、ファイバーモード径が通常通信で用いられているもの (5 ~ 6 μ m) よりも広い、例えば 20 ~ 30 μ m の大モード径ファイバーを使用することが望ましい。

更に、最終段の光ファイバー増幅器 (例えば図 2 の光ファイバー増幅器 25) において高出力を得るためには、その大モード径ファイバーに代えて、ファイバー・クラッドが二重構造となったダブル・クラッド・ファイバーを用いるようにしてもよい。この光ファイバーでは、コアの部分にレーザ光の増幅に寄与するイオンがドープされており、増幅されるレーザ光 (信号) がこのコア内を伝搬する。そして、コアを取り巻く
20 第 1 クラッドに励起用半導体レーザをカップリングする。この第 1 クラッドはマルチモードであり、断面積も大きいいため高出力の励起用半導体

レーザ光の伝導が容易であり、マルチモード発振の半導体レーザを効率よくカップリングし、励起用光源を効率よく使用することができる。その第1クラッドの外周には第1クラッドの導波路を形成するための第2クラッドが形成されている。

5 また、上記の実施の形態の光ファイバー増幅器として石英ファイバー、又はシリケート系ファイバーを用いることができるが、これらの他にフッ化物系ファイバー、例えばZBLANファイバーを用いるようにしてもよい。このフッ化物系ファイバーでは、石英やシリケート系などに比べてエルビウム・ドープ濃度を大きくすることができ、これにより増幅
10 に必要なファイバー長を短縮することができる。このフッ化物系ファイバーは、特に最終段の光ファイバー増幅器（図2の光ファイバー増幅器25）に適用することが望ましく、ファイバー長の短縮により、パルス光のファイバー伝播中の非線形効果による波長幅の広がりを抑えることができ、例えば露光装置に必要な波長幅が狭帯化された光源を得ることが可能となる。特に開口数が大きい投影光学系を有する露光装置でこの
15 狭帯化光源が使用できることは、例えば投影光学系を設計、製造する上で有利である。

更に、フォスフェイトガラス、又は酸化ビスマス系ガラス（ Bi_2O_3 、 B_2O_3 ）を主材とする光ファイバーを、特に最終段の光ファイバー
20 増幅器として用いるようにしてもよい。ここで、フォスフェイトガラス光ファイバーでは、高密度に希土類元素（例えばエルビウム（Er）、又はエルビウム（Er）とイットルビウム（Yb）との両方）をコアに添加（ドープ）することができ、同一の光増幅率を得るために必要なファイバ長が従来のシリカガラス光ファイバーの1/100程度となる。
25 また、酸化ビスマス系ガラス光ファイバーでは、従来のシリカガラスと比べて、エルビウム（Er）のドープ量を100倍程度以上にするこ

ができ、フォスフェイトガラスの場合と同様の効果を得ることができる。

ところで、前述のように二重構造のクラッドを持つ光ファイバー増幅器の出力波長として $1.51 \sim 1.59 \mu\text{m}$ を使用する場合には、ドー
プするイオンとしてエルビウム (Er) に加えイッテルビウム (Yb)
5 を共にドーピングすることが好ましい。これは半導体レーザによる励起効率
を向上させる効果があるためである。すなわち、エルビウムとイッテル
ビウムとの両方をドーピングする場合、イッテルビウムの強い吸収波長が $915 \sim 975 \text{ nm}$ 付近に広がっており、この近傍の波長で各々異なる発
振波長を持つ複数の半導体レーザを波長分割多重 (WDM) により結合
10 させて第1クラッドにカップリングすることで、その複数の半導体レー
ザを励起光として使用できるため大きな励起強度を実現することができる。
る。

また、光ファイバー増幅器のドーピング・ファイバーの設計については、
本例のように予め定められた一定の波長で動作する装置 (例えば露光装
15 置) では、所望の波長における光ファイバー増幅器の利得が大きくなる
ように材質を選択することが望ましい。例えば、ArFエキシマレーザ
と同じ出力波長 ($193 \sim 194 \text{ nm}$) を得るための紫外レーザ装置に
おいて、光増幅器用ファイバーを用いる場合には所望の波長、例えば $1.548 \mu\text{m}$ で利得が大きくなる材質を選ぶことが望ましい。

20 しかしながら、通信用ファイバーでは波長分割多重化通信のため、 $1.55 \mu\text{m}$ 付近の数十nmの波長領域で、比較的平坦な利得を持つように
設計されている。そこで、例えば励起媒質としてエルビウム単一ドー
プのコアを持つ通信用ファイバーでは、この平坦な利得特性を実現するた
めに、アルミニウムやリンをシリカファイバーにコ・ドーピングする手法が
25 用いられる。このためこの種のファイバーでは、 $1.548 \mu\text{m}$ で必ず
しも利得が大きくなる。また、ドーピング元素のアルミニウムは、1.

5 5 μm 付近のピークを長波長側にシフトさせ、リンは短波長側にシフトさせる効果を持つ。従って、1. 547 μm 近傍で利得を大きくするためには、少量のリンをドーピングすればよい。同様に、例えばエルビウムとイッテルビウムとを共にドーピング（コ・ドーピング）したコアを持つ光増幅器用ファイバー（例えば前記ダブル・クラッド・タイプのファイバー）を用いる場合にも、コアに少量のリンを加えることにより、1. 547 μm 付近でより高い利得を得ることができる。

次に、図1の実施の形態の紫外光発生装置における波長変換部20のいくつかの構成例につき説明する。

10 図8(a)は、2次高調波発生を繰り返して8倍波を得ることができる波長変換部20を示し、この図8(a)において、光ファイバー・バンドル19の出力端19aから出力された波長1. 544 μm （周波数を ω とする）のレーザ光LB4の基本波は、1段目の非線形光学結晶502に入射し、ここでの2次高調波発生により基本波の周波数 ω の2倍の周波数 2ω （波長は $1/2$ の772 nm）の2倍波が発生する。この2倍波は、レンズ505を経て2段目の非線形光学結晶503に入射し、ここでも再び2次高調波発生により、入射波の周波数 2ω の2倍、即ち基本波に対し4倍の周波数 4ω （波長は $1/4$ の386 nm）を持つ4倍波が発生する。発生した4倍波は更にレンズ506を介して3段目の非線形光学結晶504に進み、ここで再び2次高調波発生によって、入射波の周波数 4ω の2倍、即ち基本波に対し8倍の周波数 8ω を有する8倍波（波長は $1/8$ の193 nm）が発生する。この8倍波は紫外のレーザ光LB5として射出される。即ち、この構成例では、基本波（波長1. 544 μm ） \rightarrow 2倍波（波長772 nm） \rightarrow 4倍波（波長386 nm） \rightarrow 8倍波（波長193 nm）の順に波長変換が行われる。

前記波長変換に使用する非線形光学結晶としては、例えば基本波から

2倍波への変換を行う非線形光学結晶502には LiB_3O_5 (LBO)結晶を、2倍波から4倍波への変換を行う非線形光学結晶503には LiB_3O_5 (LBO)結晶を、4倍波から8倍波への変換を行う非線形光学結晶504には $\text{Sr}_2\text{Be}_2\text{B}_2\text{O}_7$ (SBBO)結晶を使用する。

5 ここで、LBO結晶を使用した基本波から2倍波への変換には、波長変換のための位相整合にLBO結晶の温度調節による整合方法 (Non-Critical Phase Matching: NCPM) を使用する。NCPMは、非線形光学結晶内での基本波と第二高調波との間の角度ずれである「Walk-off」が
10 起こらないため、高効率で2倍波への変換を可能にし、また発生した2倍波はWalk-offによるビームの変形も受けないため有利である。

 なお、図8 (a) において、光ファイバー・バンドル19と非線形光学結晶502との間に、レーザ光LB4の入射効率を高めるために集光レンズを設けることが望ましい。この際に、光ファイバー・バンドル19を構成する各光ファイバーのモード径 (コア径) は例えば $20\mu\text{m}$ 程度であり、非線形光学結晶中で変換効率の高い領域の大きさは例えば
15 $200\mu\text{m}$ 程度であるため、各光ファイバー毎に10倍程度の倍率の微小レンズを設けて、各光ファイバーから射出されるレーザ光を非線形光学結晶502中に集光するようにしてもよい。これは以下の構成例でも同様である。

20 次に、図8 (b) は2次高調波発生と和周波発生とを組み合わせることで8倍波を得ることができる波長変換部20Aを示し、この図8 (b) において、光ファイバー・バンドル19の出力端19aから射出された波長 $1.544\mu\text{m}$ のレーザ光LB4の基本波は、LBO結晶よりなり上記のNCPMで制御されている1段目の非線形光学結晶507に入射し、
25 ここでの2次高調波発生により2倍波 (波長 722nm) が発生する。更に、非線形光学結晶507中を基本波の一部がそのまま透過する。こ

の基本波及び2倍波は、共に直線偏光状態で波長板（例えば1/2波長板）508を透過して、基本波のみが偏光方向が90度回転した状態で射出される。この基本波と2倍波とはそれぞれレンズ509を通して2段目の非線形光学結晶510に入射する。

5 非線形光学結晶510では、1段目の非線形光学結晶507で発生した2倍波と、変換されずに透過した基本波とから和周波発生により3倍波（波長515nm）を得る。非線形光学結晶510としてはLBO結晶が用いられるが、1段目の非線形光学結晶507（LBO結晶）とは温度が異なるNCPMで使用される。非線形光学結晶510で得られた
10 3倍波と、波長変換されずに透過した2倍波とは、ダイクロイック・ミラー511により分離されて、ダイクロイック・ミラー511で反射された3倍波は、ミラーM1で反射されレンズ513を通して3段目の β -BaB₂O₄（BBO）結晶よりなる非線形光学結晶514に入射する。ここで3倍波が2次高調波発生により6倍波（波長257nm）に
15 変換される。

一方、ダイクロイック・ミラー511を透過した2倍波はレンズ512及びミラーM2を経てダイクロイック・ミラー516に入射し、非線形光学結晶514で得られた6倍波もレンズ515を経てダイクロイック・ミラー516に入射し、ここでその2倍波と6倍波とは同軸に合成
20 されて4段目のBBO結晶よりなる非線形光学結晶517に入射する。非線形光学結晶517では、6倍波と2倍波とから和周波発生により8倍波（波長193nm）を得る。この8倍波は紫外のレーザ光LB5として射出される。なお、4段目の非線形光学結晶517として、BBO結晶の代わりにCsLiB₆O₁₀（CLBO）結晶を用いることも可能
25 である。この波長変換部20Aでは、基本波（波長1.544μm）→2倍波（波長772nm）→3倍波（波長515nm）→6倍波（波長

2 5 7 nm) → 8 倍波 (波長 1 9 3 nm) の順に波長変換が行われている。

このように 6 倍波と 2 倍波との一方が分岐光路を通して 4 段目の非線形光学結晶 5 1 7 に入射する構成では、6 倍波と 2 倍波とをそれぞれ 4
5 段目の非線形光学結晶 5 1 7 に集光して入射させるレンズ 5 1 5, 5 1 2 を互いに異なる光路に配置することができる。この場合、3 段目の非線形光学結晶 5 1 4 で発生した 6 倍波はその断面形状が Walk-off 現象により長円形になっているため、4 段目の非線形光学結晶 5 1 7 で良好な変換効率を得るためには、その 6 倍波のビーム整形を行うことが望ましい。
10 い。そこで本例のように、レンズ 5 1 5, 5 1 2 を別々の光路に配置することにより、例えばレンズ 5 1 5 としてシリンドリカルレンズ対を用いること等が可能となり、6 倍波のビーム整形を容易に行うことができる。このため、4 段目の非線形光学結晶 (BBO 結晶) 5 1 7 での 2 倍波との重なり部を増加させて、変換効率を高めることが可能である。

15 なお、2 段目の非線形光学結晶 5 1 0 と 4 段目の非線形光学結晶 5 1 7 との間の構成は図 8 (b) に限られるものではなく、4 段目の非線形光学結晶 5 1 7 に 6 倍波と 2 倍波とが同時に入射するように、6 倍波と 2 倍波とでその光路長が等しくなっていれば、いかなる構成であってもよい。更に、例えば 2 段目の非線形光学結晶 5 1 0 と同一光軸上に 3 段目及び 4 段目の非線形光学結晶 5 1 4, 5 1 7 を配置し、3 段目の非線形光学結晶 5 1 4 で 3 倍波のみを 2 次高調波発生により 6 倍波に変換して、波長変換されない 2 倍波と共に 4 段目の非線形光学結晶 5 1 7 に入射させてもよく、これによりダイクロイック・ミラー 5 1 1, 5 1 6 を用いる必要がなくなる。

25 また、図 8 (a) 及び (b) に示した波長変換部 2 0, 2 0 A についてそれぞれ各チャネル当たりの 8 倍波 (波長 1 9 3 nm) の平均出力を

実験的に求めて見た。基本波の出力は前述の実施形態で説明した通り各チャンネルの出力端で、ピーク・パワー20 kW、パルス幅1 ns、パルス繰り返し周波数100 kHz、及び平均出力2 Wである。この結果、各チャンネル当たりの8倍波の平均出力は、図8 (a)の波長変換部20では229 mW、図8 (b)の波長変換部20 Aでは38.3 mWであった。従って、全128チャンネルを合わせたバンドルからの平均出力は、波長変換部20では29 W、波長変換部20 Aでは4.9 Wとなり、何れの波長変換部20, 20 Aであっても露光装置用光源として十分な出力の、波長193 nmの紫外光を提供することができる。

なお、波長変換部20, 20 Aと同様の構成によって、基本波(波長1.544 μ m) → 2倍波(波長772 nm) → 4倍波(波長386 nm) → 6倍波(波長257 nm) → 8倍波(波長193 nm)の順に波長変換することも可能である。更に、基本波(波長1.544 μ m) → 2倍波(波長772 nm) → 3倍波(波長515 nm) → 4倍波(波長386 nm) → 7倍波(波長221 nm) → 8倍波(波長193 nm)の順に波長変換することも可能であり、基本波(波長1.544 μ m) → 2倍波(波長772 nm) → 3倍波(波長515 nm) → 4倍波(波長386 nm) → 6倍波(波長257 nm) → 7倍波(波長221 nm) → 8倍波(波長193 nm)の順に波長変換することによっても8倍波を得ることができる。これらの中から変換効率が高く、構成が簡素化できるものを使用することが望ましい。

次に、F₂ レーザ(波長157 nm)とほぼ同一の波長の紫外光を得るための波長変換部の構成例につき説明する。この場合には、図1 (a)の単一波長発振レーザ11において発生する基本波の波長を1.57 μ mとして、波長変換部20として10倍波の発生を行う波長変換部を使用すればよい。

図9 (a) は、2次高調波発生と和周波発生とを組み合わせることで10倍波を得ることができる波長変換部20Bを示し、この図9 (b) において、光ファイバー・バンドル19の出力端19aから射出された波長1.57 μm のレーザ光LB4の基本波は、LBO結晶よりなる1段目の非線形光学結晶602に入射し、2次高調波発生により2倍波に変換される。この2倍波は、レンズ603を介してLBOよりなる第2の非線形光学結晶604に入射して、2次高調波発生による4倍波に変換され、一部は2倍波のままで透過する。

非線形光学結晶604を透過した4倍波及び2倍波は、ダイクロイック・ミラー605に向かい、ダイクロイック・ミラー605で反射された4倍波は、ミラーM1で反射されレンズ608を通して3段目の $\text{Sr}_2\text{Be}_2\text{B}_2\text{O}_7$ (SBB O) 結晶よりなる非線形光学結晶609に入射して、2次高調波発生により8倍波に変換される。一方、ダイクロイック・ミラー605を透過した2倍波はレンズ606及びミラーM2を経てダイクロイック・ミラー607に入射し、非線形光学結晶609で得られた8倍波もレンズ610を経てダイクロイック・ミラー607に入射し、ここでその2倍波と8倍波とは同軸に合成されて4段目のSBB O結晶よりなる非線形光学結晶611に入射し、ここで8倍波と2倍波とからの和周波発生により10倍波(波長157 nm) が得られる。この10倍波は紫外のレーザ光LB5として射出される。即ち、波長変換部20Bでは、基本波(波長1.57 μm) \rightarrow 2倍波(波長785 nm) \rightarrow 4倍波(波長392.5 nm) \rightarrow 8倍波(波長196.25 nm) \rightarrow 10倍波(波長157 nm) の順に波長変換が行われる。

この構成例においても、ダイクロイック・ミラー605、607を用いずに4つの非線形光学結晶602、604、609、611を同一光軸上に配置してもよい。但し、本例では2段目の非線形光学結晶604

で発生した4倍波はその断面形状がWalk-off現象により長円形になっている。このため、このビームを入力とする4段目の非線形光学結晶611で良好な変換効率を得るためには、入射ビームとなる4倍波のビーム形状を整形し、2倍波との重なり部を広くすることが望ましい。本例では、集光用のレンズ606、608を別々の光路に配置することができるので、例えばレンズ608としてシリンドリカルレンズを用いることによって、4倍波のビーム整形を容易に行うことができる。このため、変換効率を高めることが可能である。

また、F₂ レーザ（波長157nm）とほぼ同一波長の紫外光を得るためには、図1（a）の単一波長発振レーザ11において発生する基本波の波長を1.099μmとして、波長変換部20として7倍波の発生を行う波長変換部を使用する方法も考えられる。

図9（b）は、2次高調波発生と和周波発生とを組み合わせることで7倍波を得ることができる波長変換部20Cを示し、この図9（b）において、光ファイバー・バンドル19の出力端19aから射出された波長1.099μmのレーザ光LB4（基本波）は、LBO結晶よりなる1段目の非線形光学結晶702に入射し、ここでの2次高調波発生により2倍波が発生し、基本波の一部はそのまま透過する。この基本波及び2倍波は、共に直線偏光状態で波長板（例えば1/2波長板）703を透過して、基本波のみの偏光方向が90度回転する。基本波及び2倍波はレンズ704を介してLBO結晶よりなる第2の非線形光学結晶705に入射し、ここでの和周波発生により3倍波が発生すると共に、2倍波の一部がそのまま透過する。

非線形光学結晶705から発生される2倍波と3倍波とはダイクロイック・ミラー706で分岐され、ここを透過した3倍波はレンズ707及びミラーM2を経てダイクロイック・ミラー708に入射する。一方、

ダイクロイック・ミラー 706 で反射された 2 倍波は、ミラー M1 及び
レンズ 709 を通って SBB0 結晶よりなる第 3 の非線形光学結晶 71
0 に入射し、2 次高調波発生により 4 倍波に変換される。この 4 倍波は、
レンズ 711 を経てダイクロイック・ミラー 708 に入射し、ダイクロ
5 イック・ミラー 708 で同軸に合成された 3 倍波及び 4 倍波は、SBB
O 結晶よりなる第 4 の非線形光学結晶 712 に入射し、ここでの和周波
発生により 7 倍波（波長 157 nm）に変換される。この 7 倍波は紫外
のレーザ光 LB5 として射出される。即ち、この構成例では、基本波
（波長 1.099 μ m） \rightarrow 2 倍波（波長 549.5 nm） \rightarrow 3 倍波（波
10 長 366.3 nm） \rightarrow 4 倍波（波長 274.8 nm） \rightarrow 7 倍波（波長 1
57 nm）の順に波長変換される。

この構成例においても、ダイクロイック・ミラー 706, 708 を用
いずに 4 つの非線形光学結晶 702, 705, 710, 712 を同一光
軸上に配置してもよい。また、この例でも、3 段目の非線形光学結晶 7
15 10 で発生した 4 倍波はその断面形状が Walk-off 現象により長円形にな
っている。このため、このビームを入力とする 4 段目の非線形光学結晶
712 で良好な変換効率を得るためには、レンズ 711 としてシリンド
リカルレンズを用いることによって、3 倍波と 4 倍波との重なり部を最
大にすればよい。

20 なお、上記の実施の形態では、図 1 (a) より分かるように m 組の n
個の光増幅ユニット 18-1 ~ 18-n の出力の合成光を一つの波長変
換部 20 で波長変換している。しかしながら、その代わりに、例えば m
' 個 (m' は 2 以上の整数) の波長変換部を用意し、m 組の光増幅ユニ
ット 18-1 ~ 18-n の出力を n' 個ずつ m' 個のグループに分けて、
25 各グループ毎に 1 つの波長変換部で波長変換を行い、得られた m' 個
（本例では例えば m' = 4 又は 5 等）の紫外光を合成するようにしても

よい。即ち、波長変換部 20 は上記構成に限られるものではなく任意でよいし、非線形光学結晶として上記以外、例えば CBO 結晶 (CsB_3O_5)、四ほう酸リチウム ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$)、KAB ($\text{K}_2\text{Al}_2\text{B}_4\text{O}_7$)、GdYCOB ($\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$) などを用いてもよい。

5 上記の実施の形態の紫外光発生装置によれば、図 1 (a) の光ファイバー・バンドル 19 の出力端の直径が全チャネルを合わせても 2 mm 程度以下であるため、1 個、又は数個の波長変換部 20 ですべてのチャネルの波長変換を行うことが可能である。しかも、出力端が柔軟な光ファイバーを使用しているため、波長変換部、単一波長発振レーザ、及びスプリッタ等の構成部を分けて配置することが可能となるなど、配置の自由度が極めて高い。従って、本例の紫外光発生装置によれば、安価でコンパクト、かつ単一波長でありながら空間的コヒーレンスの低い紫外レーザ装置が提供できる。

次に、図 1 (a) の紫外光発生装置を用いた露光装置の一例につき説明する。図 10 は、本例の露光装置を示し、この図 10 において、露光光源 161 としては、図 1 (a) の紫外光発生装置で出力されるレーザ光の波長を 193 nm、157 nm、又はそれ以外の紫外域とした装置を使用することができる。露光光源 161 から射出されたレーザ光 LB5 は露光光 IL として照明系 162 に入射する。照明系 162 は、露光光 IL の照度分布を均一化するオプティカル・インテグレータ（ホモジナイザー）、開口絞り、リレーレンズ、視野絞り（レチクルブラインド）、及びコンデンサレンズ等から構成され、照明系 162 から射出された露光光 IL が、マスクとしてのレチクル 163 のパターン面のスリット状の照明領域を均一な照度分布で照明する。この際に本例の露光光 IL は空間コヒーレンスが低いため、照明系 162 中の空間コヒーレンスを低下させるための部材の構成を簡素化でき、露光装置を更に小型化

できる。

レチクル 1 6 3 はレチクルステージ 1 6 4 上に載置されており、レチクル 1 6 3 を透過した露光光 I L は投影光学系 1 6 5 を介して被露光基板としてのウエハ (wafer) 1 6 6 上に照明領域の内のパターンの縮小像を倍率 M_{RW} (例えば $1/4$, $1/5$, $1/6$ 等) で投影する。投影光学系 1 6 5 としては、屈折系、反射系、又は反射屈折系が使用できる。但し、露光光 I L が波長 200 nm 程度以下の真空紫外光である場合には高透過率の材料が限定されるため、投影光学系を小型化して、かつ結像性能を高めるために反射屈折系を使用してもよい。ウエハ 1 6 6 にはフォトレジストが塗布されており、ウエハ 1 6 6 は、例えば半導体 (シリコン等) 又は SOI (silicon on insulator) 等の円板状の基板である。

ウエハ 1 6 6 は、ウエハステージ 1 6 7 上に保持され、ウエハ 1 6 6 の 3 次元的位置は駆動部 1 6 9 によって駆動されるウエハステージ 1 6 7 によって設定される。そして、露光時には、ウエハステージ 1 6 7 のステップ移動によってウエハ 1 6 6 の位置決めを行った後、照明領域に対してレチクルステージ 1 6 4 を介してレチクル 1 6 3 を所定方向に走査し、ウエハ 1 6 6 をウエハステージ 1 6 7 を介して倍率 M_{RW} を速度比として走査するというステップ・アンド・スキャン方式で、ウエハ 1 6 6 上の各ショット領域にレチクル 1 6 3 のパターンの像が転写される。このように本例の露光装置は走査露光型であるが、露光光源 1 6 1 はステッパー等の一括露光型の露光装置にも適用できることは明らかである。

この場合、本例の露光光源 1 6 1 は小型であるため、照明系 1 6 2 を支持する架台に露光光源 1 6 1 の少なくとも一部 (例えば波長変換部 20 など) を一緒に固定しても良い。あるいは露光光源 1 6 1 を単独で架台に固定しても良い。但し、露光光源 1 6 1 に接続される電源などは別置きにしておくことが好ましい。

以上のように、本例の紫外光発生装置を用いた露光装置は従来の他の方式（エキシマレーザやアレイレーザを用いた露光装置）にくらべて小型であり、また、各要素が光ファイバーで接続されて構成されているため、装置を構成する各ユニットの配置の自由度が高い利点がある。

5 ところで、前述の走査露光時における露光量制御では、図1（a）の光変調素子12によって規定されるパルス繰り返し周波数 f と、遅延素子（光ファイバー15-1～15-m, 17-1～17-n）によって規定されるチャネル間の遅延時間との少なくとも一方を調整して、走査露光中に基本波発生部171から複数のパルス光を等時間間隔で発振させるようにしてもよい。更に、フォトレジストの感度特性に応じて、ウエハ166上でのパルス光の強度、ウエハ166の走査速度、パルス光の発振間隔（周波数）、及びウエハ166の走査方向に関するパルス光（即ちその照射領域）の幅の少なくとも1つを調整し、ウエハ上の各点が照射領域を横切る間に照射される複数のパルス光の積算光量を適正露光量に制御する。このとき、スループットを考慮して、ウエハ166の走査速度がウエハステージ167の最高速度にほぼ維持されるように、他の制御パラメータ、即ちパルス光の強度、発振周波数、及び照射領域の幅の少なくとも1つを調整することが好ましい。

10
15

図11は、本例の紫外光発生装置を用いた他の露光装置を示し、この図11において、図1（a）の紫外光発生装置は分離されて装着されている。即ち、図10に対応する部分に同一符号を付して示す図11において、図1（a）の波長変換部20に対応する波長変換部172は露光機本体に載置されている。一方、図1（a）の単一波長発振レーザ11から光分岐増幅部4までの部材に対応する光源本体部171が露光装置本体の外部に設けられ、これらの間が接続用光ファイバー173で接続されている。接続用光ファイバー173は、図1（a）の光ファイバー

20
25

・バンドル 19 に対応するものである。

このような構成とすることにより、光ファイバー増幅器の励起用半導体レーザや半導体レーザのドライブ用電源、温度コントローラ等の発熱を伴う主要な構成部分を露光機本体の外に配設することができる。従って、露光装置本体が露光光源である紫外光発生装置からの発熱の影響を受けて光軸のアライメントがずれる等の熱に起因する問題を抑制することができる。

また、図 11 に示すようにレチクル 163 を保持するレチクルステージ 164 は駆動機構 168 によって X 方向、Y 方向に移動可能で、かつ微小回転可能に構成されている。そして、ウエハステージ 167 を駆動する駆動部 169、及びレチクルステージ 164 の駆動機構 168 の動作は主制御系 177 によって制御されている。

また、ウエハステージ 167 上には基準マーク板 FM が設けられており、この基準マーク板 FM は後述するベースライン計測などに用いられる。更に本例では、レチクル 163 上のアライメントマークを検出するアライメント系 180 と、投影光学系 165 を介さないオフ・アクシス方式のアライメント系 181 とが設けられている。

アライメント系 180 は、露光光、又はそれと同一波長域の照明光をレチクル 163 上のアライメントマーク、及び投影光学系 165 を通して基準マーク板 FM 上の基準マーク（又はウエハ 166 上のアライメントマーク）にそれぞれ照射すると共に、両マークから発生する光を撮像素子（CCD）で受光してその位置ずれを検出するものであり、レチクル 163 のアライメントやアライメント系 181 のベースライン計測などに用いられる。

オフ・アクシス方式のアライメント系 181 は、例えば 550 ～ 750 nm 程度の波長幅を持つ白色光（ブロードバンド光）をウエハ 166

上のアライメントマークに照射すると共に、その内部に設けられる指標マークの像とアライメントマークの像とを撮像素子（CCD）上に結像させて両マークの位置ずれを検出するものである。

5 なお、アライメント系180、181でそれぞれ基準マーク板FM上の基準マークを検出することで、その検出結果からアライメント系181のベースライン量（検出中心と露光中心との間隔）を計測することができる。なお、ベースライン計測はウエハの露光開始前に行われるが、ウエハを交換するたびにベースライン計測を行ってもよいし、あるいは複数枚のウエハの露光動作に1回程度の割合でベースライン計測を行う
10 ようにしてもよい。但し、レチクル交換後には必ずベースライン計測が行われる。

さて、本例では光源本体部171からのレーザ光の一部を分岐して光ファイバー178を介して波長変換部179に供給する。波長変換部179としては、図1（a）の波長変換部20と同様で、かつ小型の波長
15 変換部を使用する。波長変換部179はアライメント系180を保持する架台に一体に設けておき、波長変換部179から射出される紫外光をアライメント系180の照明光として使用する。

これにより、アライメント系180の光源を別途用意する必要がなくなると共に、露光光と同一波長の照明光を用いて基準マーク又はアライ
20 メントマークを検出でき、高精度なマーク検出が可能となる。

なお、前述した実施形態で用いる光ファイバー（光ファイバー増幅器などを含む）はその表面を脱ガスが少ないテフロン、又はフッ素系樹脂などで被覆しておくことが好ましい。これは、光ファイバーから発生する異物（繊維などを含む）が露光装置を汚染する物質となり得るため、
25 そのような汚染物質の発生を防止するためである。但し、テフロンなどで被覆する代わりに、チャンバー内に配置される光ファイバーをまとめ

てステンレス製の筐体に収納するようにしてもよい。

また、上記の実施の形態の例えば図 1 1 の露光装置では、レチクル 1 6 3 上のマークあるいはレチクルステージ 1 6 4 に設けられる基準マークを露光光と同一波長の照明光で照明し、投影光学系 1 6 5 によって形成されるマーク像をウエハステージ 1 6 7 に設けられる開口（スリットなど）を介して検出する空間像計測系を設けるようにしてもよい。この空間像計測系用の照明光を発生する光源として前述の光源（1 7 1, 1 7 9）と同一構成の光源（図 1 の紫外光発生装置と同様の光源）を別途用意してもよいし、光源本体部 1 7 1 ～照明系 1 6 2 よりなる露光用光源を兼用してもよい。

なお、前述の実施形態では図 1 のレーザ装置を露光装置の露光用光源、あるいはアライメント系又は空間像計測系の光源として用いるものとしたが、これら以外のマーク検出系や光学系などの調整用光源などとして用いてもよいし、デバイス製造工程で用いられる露光装置や検査装置などだけでなく、用途などに関係なく各種装置（一例としてはエキシマレーザを光源とするもの、例えば角膜の曲率や凹凸を矯正して近眼、乱視などの治療を行うレーザ治療装置など）の光源として用いてもよい。

また、複数のレンズから構成される照明光学系、投影光学系を露光装置本体に組み込み光学調整をすると共に、多数の機械部品からなるレチクルステージやウエハステージを露光装置本体に取り付けて配線や配管を接続し、更に総合調整（電気調整、動作確認等）をすることにより本実施の形態の露光装置を製造することができる。なお、露光装置の製造は温度及びクリーン度等が管理されたクリーンルームで行うことが望ましい。

また、半導体デバイスは、デバイスの機能・性能設計を行うステップ、このステップに基づいたレチクルを製造するステップ、シリコン材料か

らウエハを制作するステップ、前述した実施の形態の露光装置によりレチクルのパターンをウエハに露光するステップ、デバイス組み立てステップ（ダイシング工程、ボンディング工程、パッケージ工程を含む）、検査ステップ等を経て製造される。

5 更に、本発明は液晶表示素子やプラズマディスプレイ素子等の表示素子、薄膜磁気ディスク、及びマイクロマシーン、DNAチップ等のデバイスを製造する際にも適用することができる。また、投影露光装置用のフォトリソマスクを製造する際にも本発明を適用することができる。

10 なお、本発明の露光光源としてのレーザ装置は、例えばウエハ上に形成された回路パターンの一部（ヒューズなど）を切断するために用いられるレーザリペア装置などにも用いることができる。また、本発明によるレーザ装置は可視光または赤外光を用いる検査装置などにも適用することができる。そしてこの場合には前述の波長変換部をレーザ装置に組み込む必要がない。即ち、本発明は紫外光発生装置だけでなく、可視域
15 または赤外域の基本波を発生する、波長変換部がないレーザ装置に対しても有効なものである。

なお、本実施の形態の露光装置として、投影光学系を用いることなくマスクと基板とを密接させてマスクのパターンを露光するプロキシミティ露光装置にも適用することができる。

20 なお、本発明は上述の実施の形態に限定されることなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の構成を取り得ることは勿論である。また、明細書、特許請求の範囲、図面、及び要約を含む1999年9月10日付け提出の日本国特許出願第11-258131号の全ての開示内容は、そっくりそのまま引用して本願に組み込まれている。

25

産業上の利用の可能性

本発明によれば、光ファイバー増幅器を用いているため、小型で、かつメンテナンスの容易なレーザ装置を露光光源として備えた露光装置を提供することができる。

5 また、使用する光学素子の非線形効果に起因した波長幅の広がりを抑
制できる。

更に、レーザ光発生部から発生するレーザ光を複数に分岐する光分岐
装置を更に備え、光増幅部をその複数に分岐されたレーザ光のそれぞれ
に独立に設けると共に、波長変換部は、その複数の光増幅部から出力さ
れたレーザ光の束をまとめて波長変換することによって、出力光の発振
10 周波数を高くして、かつ空間的コヒーレンスを低減できると共に、全体
としての発振スペクトル線幅を簡単な構成で狭くできる。

15

20

25

請 求 の 範 囲

1. レーザ装置からの紫外光で第1物体のパターンを照明し、該第1物体のパターンを経た紫外光で第2物体を露光する露光装置であって、

5 前記レーザ装置は、

赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、

10 該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を順次増幅する複数段の光ファイバー増幅器と、該複数段の光ファイバー増幅器の間に配置された狭帯域フィルタ及びアイソレータとを有する光増幅部と、

該光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部と
を備えたことを特徴とする露光装置。

15 2. 前記レーザ装置は、前記複数段の光ファイバー増幅器の少なくとも1つで用いられる励起光を発生する励起光発生光源を有し、前記光増幅器は、前記励起光を反射する反射膜が前記狭帯域フィルタに結合される光ファイバー端に形成されることを特徴とする請求の範囲1に記載の露光装置。

20 3. 前記狭帯域フィルタ及びアイソレータはフォノン・サイドバンドに相当する波長のノイズを低減することを特徴とする請求の範囲1に記載の露光装置。

4. 前記複数段の光ファイバー増幅器は少なくとも3段設けられ、各光ファイバー増幅器間にそれぞれ狭帯域フィルタ及びアイソレータを設けることを特徴とする請求の範囲1に記載の露光装置。

25 5. 前記複数段の光ファイバー増幅器の間に、A S E (Amplified Spontaneous Emission) を時間的に取り除くためのゲート素子を更に設ける

ことを特徴とする請求の範囲 1 に記載の露光装置。

6. レーザ装置からの紫外光で第 1 物体のパターンを照明し、該第 1 物体のパターンを経た紫外光で第 2 物体を露光する露光装置であって、

前記レーザ装置は、

5 赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、

該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を順次増幅する複数段の増幅用光ファイバーと、該複数段の増幅用光ファイバーの少なくとも一段の増幅用光ファイバー用の励起光を発生する励起光発生光源と、前記複数段の増幅用光ファイバーの間に配置された狭帯域フィルタ又はアイソレータと、該狭帯域フィルタ又はアイソレータと並列に前記励起光を通過させるためのバイパス部材とを有する光増幅部と、

10

該光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部と

15 を備えたことを特徴とする露光装置。

7. レーザ装置からの紫外光で第 1 物体のパターンを照明し、該第 1 物体のパターンを経た紫外光で第 2 物体を露光する露光装置であって、

前記レーザ装置は、

赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、

20

該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を順次増幅する複数段の光ファイバー増幅器と、該複数段の光ファイバー増幅器のそれぞれのために励起光を発生する複数の励起光発生光源と、前記複数段の光ファイバー増幅器の間に配置される狭帯域フィルタとを有し、該狭帯域フィルタの両側に結合された光ファイバー端に励起光を反射するための反射膜が

25

形成された光増幅部と、

該光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部と
を備えたことを特徴とする露光装置。

5 8. レーザ装置からの紫外光で第1物体のパターンを照明し、該第1物体のパターンを経た紫外光で第2物体を露光する露光装置であって、
前記レーザ装置は、

赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、

10 該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を所定の繰り返し周波数で所定幅のパルス光に変換する光変調部と、

該光変調部を通過したレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器を有する光増幅部と、

該光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部とを備え、

15 前記光変調部で変換されるパルス光の幅は、最終的に発生する紫外光で所定の波長幅を得るためのパルス幅よりも広く設定されることを特徴とする露光装置。

9. 前記光変調部で変換されるパルス光の幅は、 $2 \sim 5 \text{ ns}$ であることを特徴とする請求の範囲8に記載の露光装置。

20 10. レーザ装置からの紫外光で第1物体のパターンを照明し、該第1物体のパターンを経た紫外光で第2物体を露光する露光装置であって、
前記レーザ装置は、

赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、

25 該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器と、該光ファイバー増幅器で増幅されたレーザ光を伝播する伝送用

光ファイバーと、前記光ファイバー増幅器と前記伝送用光ファイバーとの間に配置された狭帯域フィルタとを有する光増幅部と、

該光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部と

5 を備えたことを特徴とする露光装置。

1 1. 前記狭帯域フィルタは、前記光ファイバー増幅器に励起光を供給するための合波用の波長分割多重素子としても兼用されることを特徴とする請求の範囲 1 0 に記載の露光装置。

10 1 2. 前記レーザ装置は、前記レーザ光発生部から発生するレーザ光をパルス光に変換するとともに、該パルス光の幅を前記紫外光で所定の波長幅を得るためのパルス幅よりも広く設定する光変調部を有することを特徴とする請求の範囲 1、6、7、1 0、及び 1 1 のいずれか一項に記載の露光装置。

15 1 3. 前記レーザ装置は、前記レーザ光発生部から発生するレーザ光を複数に分岐する光分岐装置を有するとともに、前記光増幅部は前記複数に分岐されたレーザ光のそれぞれ独立に設けられ、

前記複数に分岐されたレーザ光の出力をほぼ均一とするように、前記光増幅部の増幅利得を調整する調整装置を更に備えることを特徴とする請求の範囲 1 2 に記載の露光装置。

20 1 4. 前記光ファイバー増幅部は、エルビウム・ドープ・光ファイバー増幅器であり、該増幅器用の励起光として波長 (980 ± 10) nm のレーザ光を使用することを特徴とする請求の範囲 1 ~ 1 1 の何れか一項に記載の露光装置。

25 1 5. 前記狭帯域フィルタとして多層膜フィルタ又はファイバー・ブラッグ・グレーティングを使用することを特徴とする請求の範囲 1 ~ 8、1 0、及び 1 1 の何れか一項に記載の露光装置。

1 6. 前記レーザ光発生部は、

赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生する
単一波長発振レーザと、前記発生するレーザ光の発振波長を一定波長に
制御する発振波長制御手段とを備えることを特徴とする請求の範囲 1 ~
5 1 1 の何れか一項記載の露光装置。

1 7. 前記レーザ装置は、前記レーザ光発生部から発生するレーザ光を
複数に分岐する光分岐装置を更に備え、

前記光増幅部は前記複数に分岐されたレーザ光のそれぞれに独立に設
けられると共に、

10 前記波長変換部は、前記複数の光増幅部から出力されたレーザ光の束
をまとめて波長変換することを特徴とする請求の範囲 1 ~ 1 1 の何れか
一項記載の露光装置。

1 8. 前記複数に分岐されたレーザ光の出力をほぼ均一とするように、
前記光増幅部の増幅利得を調整する調整装置を更に備えることを特徴と
15 する請求の範囲 1 7 に記載の露光装置。

1 9. 前記調整装置は、前記光増幅部内で光ファイバー増幅器に用いら
れる励起光の出力を変更することを特徴とする請求の範囲 1 7 に記載の
露光装置。

2 0. レーザ装置からの紫外光で第 1 物体のパターンを照明し、該第 1
20 物体を経た紫外光で第 2 物体を露光する露光装置であって、

前記レーザ装置は、

赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生する
レーザ光発生部と、前記レーザ光を複数に分岐する光分岐装置と、前記
複数に分岐されたレーザ光をそれぞれ独立に増幅する複数の光ファイバ
25 ー増幅器と、前記増幅されたレーザ光を紫外光に波長変換する波長変換
部とを有し、

前記複数に分岐されたレーザ光の出力をほぼ均一とするように、前記複数の光ファイバー増幅器の少なくとも1つでの増幅利得を調整する調整装置を備えることを特徴とする露光装置。

5 2 1. 前記調整装置は、前記少なくとも1つの光ファイバー増幅器で用いられる励起光を発生する励起光発生光源を制御することを特徴とする請求の範囲20に記載の露光装置。

2 2. 前記レーザ光発生部は、波長が1.5 μm 付近の単一波長のレーザ光を発生し、

10 前記波長変換部は、前記光増幅部から出力される前記波長1.5 μm 付近の基本波を、8倍高調波又は10倍高調波の紫外光に変換して出力することを特徴とする請求の範囲1~11、20、及び21の何れか一項記載の露光装置。

2 3. 前記レーザ光発生部は、波長が1.1 μm 付近の単一波長のレーザ光を発生し、

15 前記波長変換部は、前記光増幅部から出力される前記波長1.1 μm 付近の基本波を、7倍高調波の紫外光に変換して出力することを特徴とする請求の範囲1~11、20、及び21の何れか一項記載の露光装置。

2 4. 請求の範囲1~11、20、及び21の何れか一項記載の露光装置であって、

20 前記レーザ装置からの紫外光を前記第1物体としてのマスクに照射する照明系と、前記マスクのパターンの像を前記第2物体としての基板上に投影する投影光学系とを有することを特徴とする露光装置。

2 5. 請求の範囲1~11、20、及び21の何れか一項記載の露光装置を用いた露光方法であって、

25 前記レーザ装置からの紫外光で前記第1物体と前記第2物体とのアライメントを行うことを特徴とする露光装置。

26. レーザ装置からの紫外光で第1物体のパターンを照明し、該第1物体のパターンを経た紫外光で第2物体を露光する露光装置の製造方法であって、

前記レーザ装置を

5 赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、

該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を順次増幅する複数段の光ファイバー増幅器と、該複数段の光ファイバー増幅器の間に配置された狭帯域フィルタ及びアイソレータとを有する光増幅部と、

10 該光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部とを所定の位置関係で配置して構成したことを特徴とする露光装置の製造方法。

27. レーザ装置からの紫外光で第1物体のパターンを照明し、該第1物体のパターンを経た紫外光で第2物体を露光する露光装置の製造方法であって、

前記レーザ装置を、

赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、

20 該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を順次増幅する複数段の増幅用光ファイバーと、該複数段の増幅用光ファイバーの少なくとも一段の増幅用光ファイバー用の励起光を発生する励起光発生光源と、前記複数段の増幅用光ファイバーの間に配置された狭帯域フィルタ又はアイソレータと、該狭帯域フィルタ又はアイソレータと並列に前記励起光を通

25 過させるためのバイパス部材とを有する光増幅部と、

該光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫

外光に波長変換する波長変換部と

を所定の位置関係で配置して構成したことを特徴とする露光装置の製造方法。

28. 請求の範囲 1 ～ 11、20、及び 21 の何れか一項記載の露光装置を用いてマスクパターンを基板上に転写する工程を含むデバイスの製造方法。

10

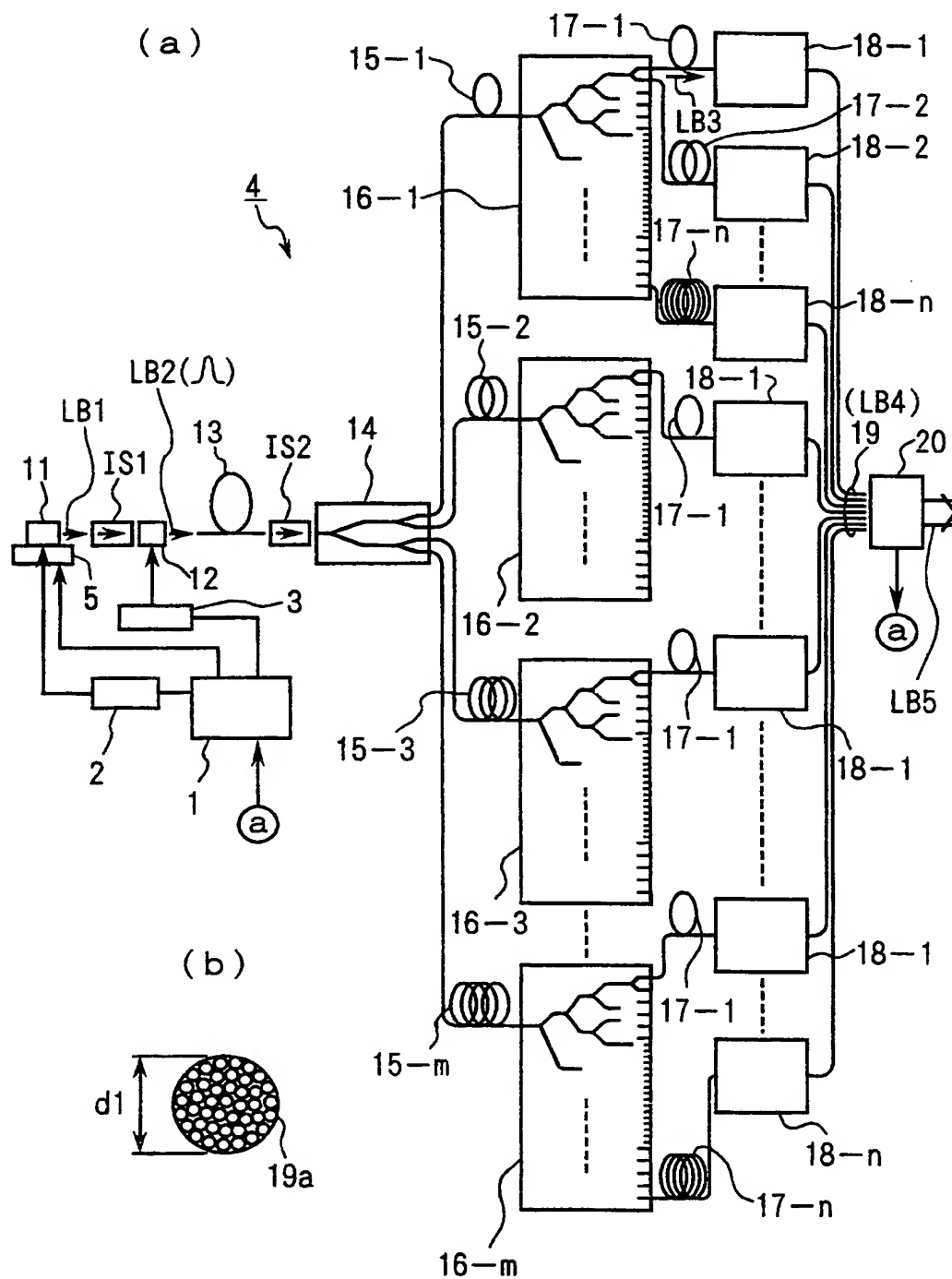
15

20

25

1/7

図 1





2/7

図 2

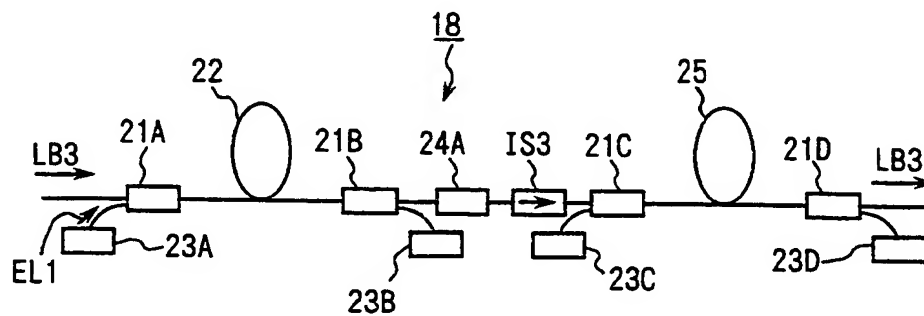


図 3

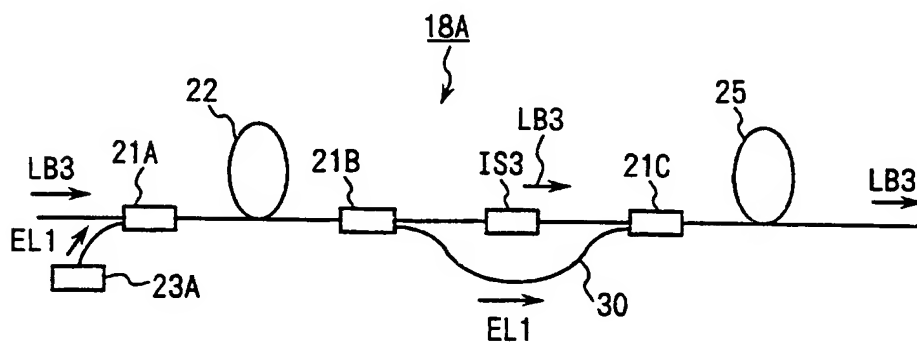
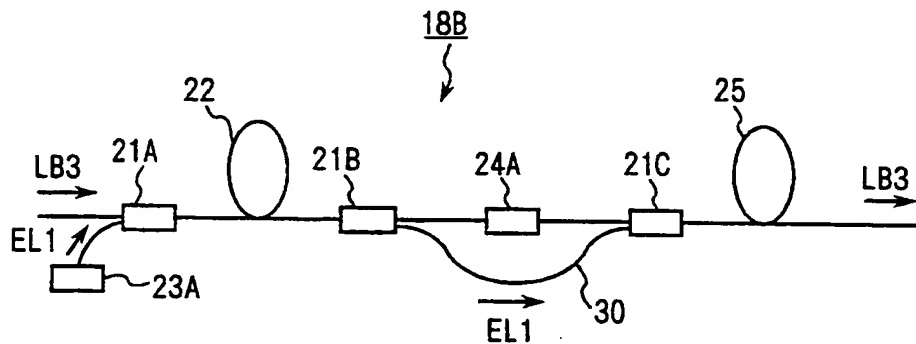


図 4





3/7

図 5

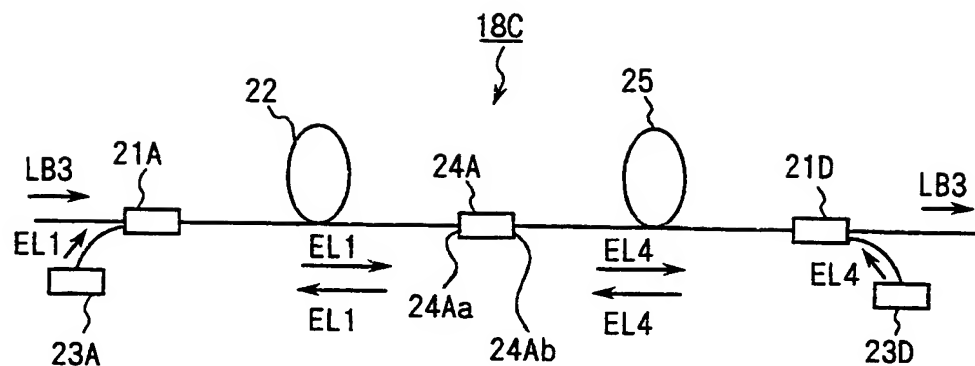


図 6

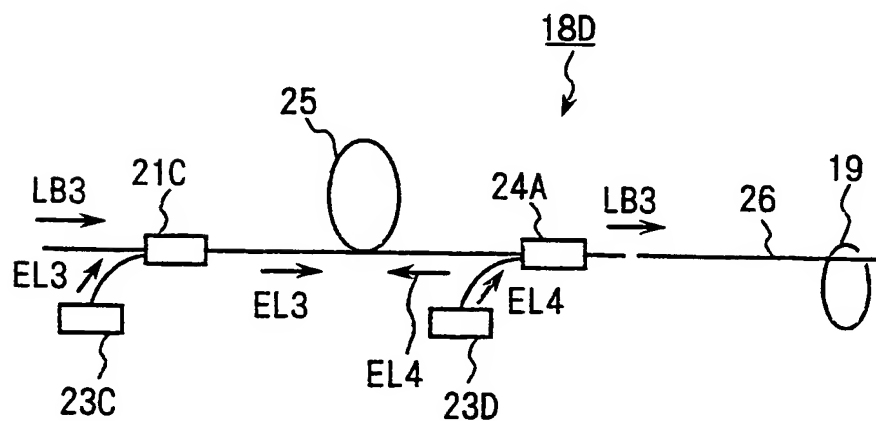
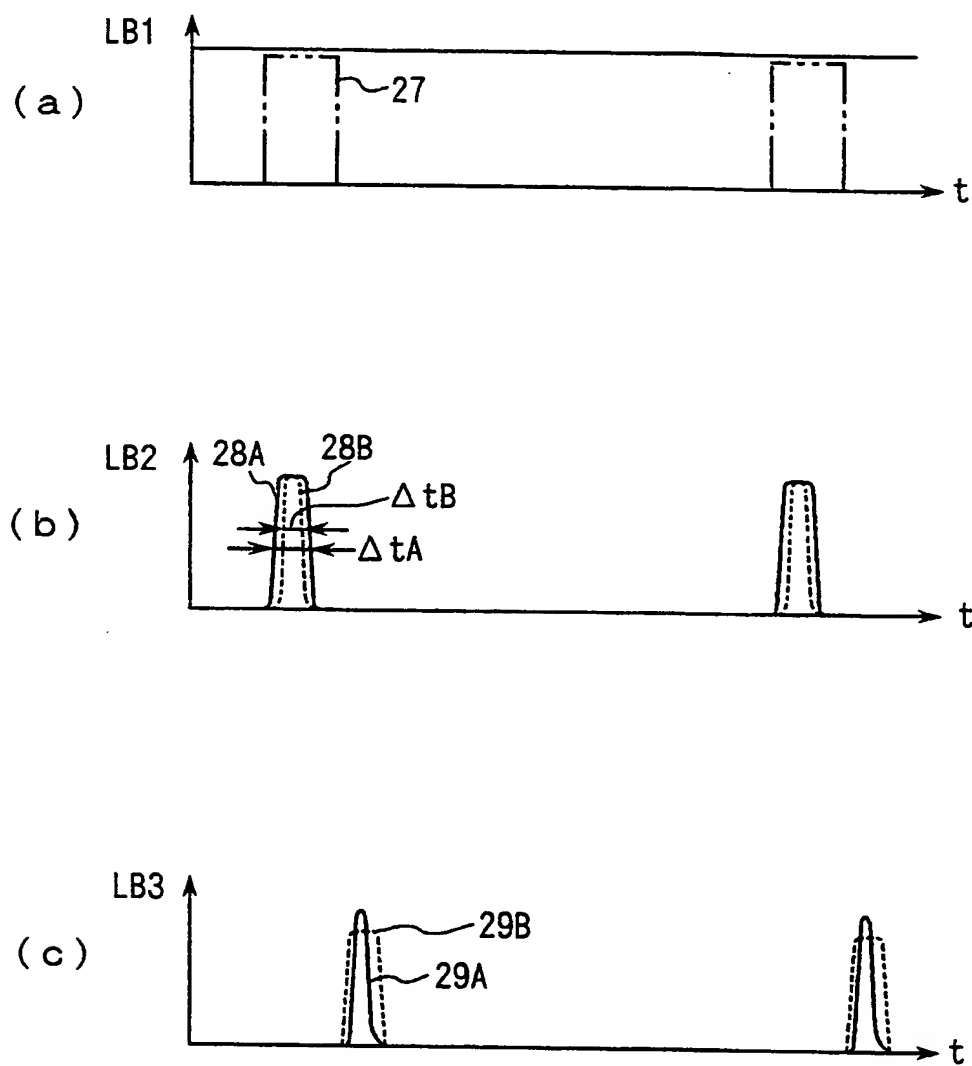




図 7





5/7

図 8

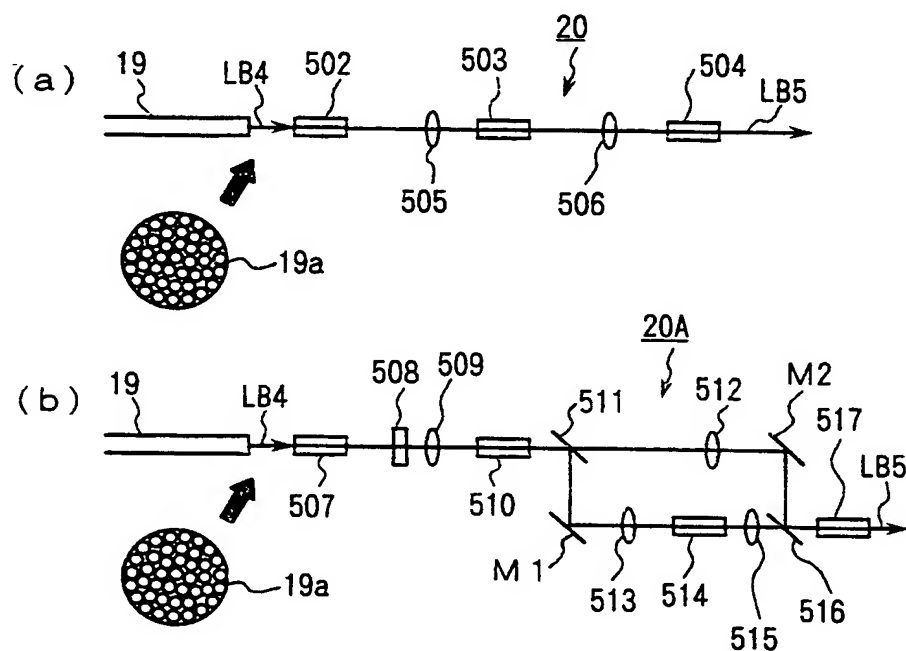
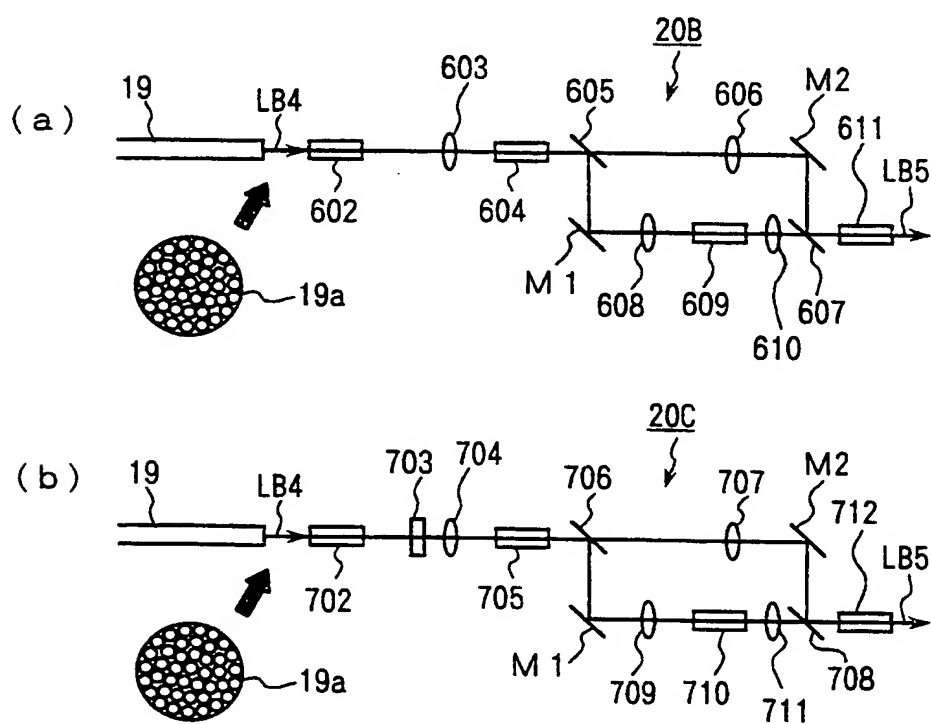


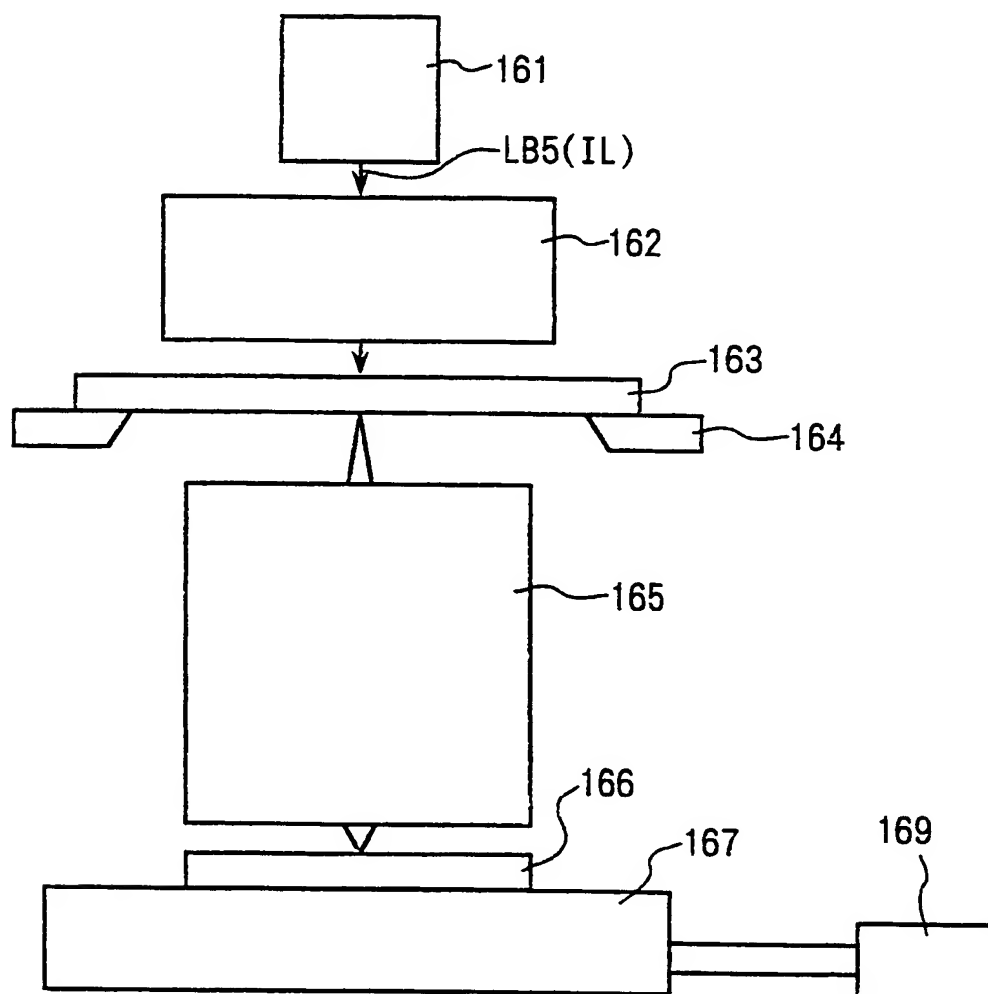
図 9





6/7

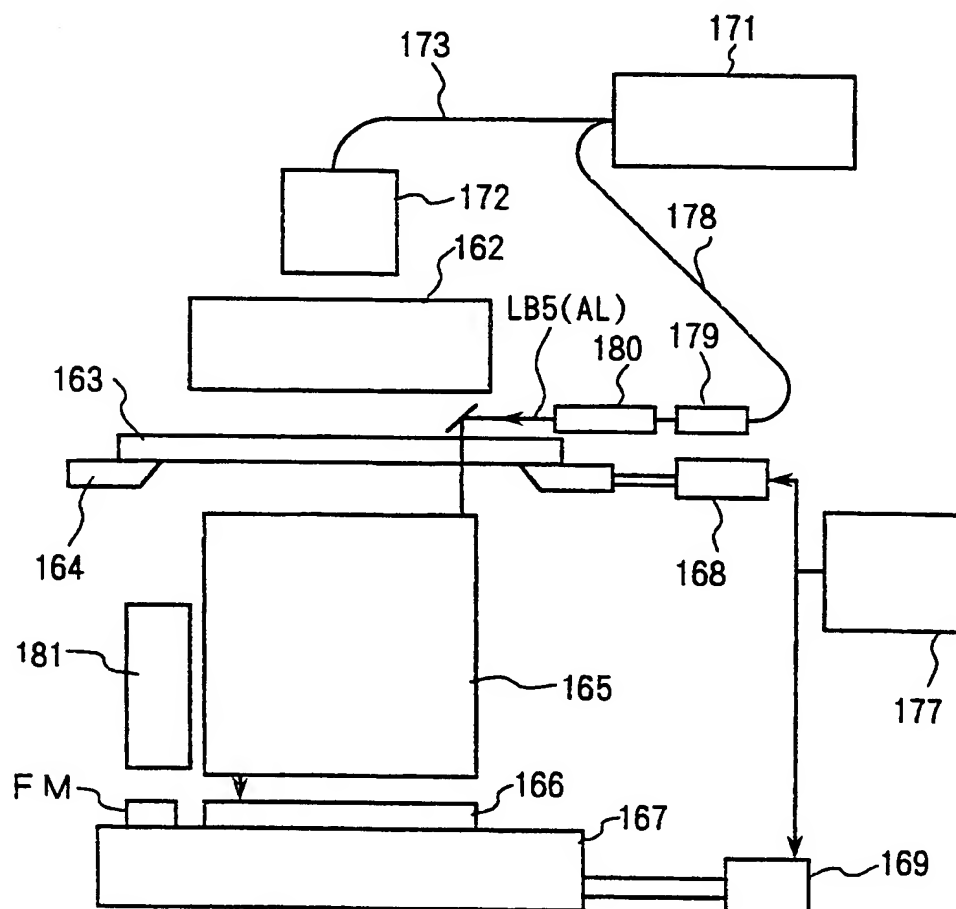
図 10





7/7

図 1 1





INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP00/06130

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ H01L21/027, G03F7/20, G02F1/37, H01S3/06,
H01S3/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ H01L21/027, G03F7/20, G02F1/37, H01S3/06,
H01S3/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1926-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2000
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2000 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2000

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US, 5838709, A (Nikon Corporation), 17 November, 1998 (17.11.98), Full text; all drawings & JP, 8-334803, A & JP, 9-148658, A	1-28
A	JP, 10-135555, A (Hitachi, Ltd.), 22 May, 1998 (22.05.98), page 1 (Family: none)	1-28
A	JP, 8-97125, A (Sony Corporation), 12 April, 1996 (12.04.96), page 1 (Family: none)	1-28
A	JP, 9-114100, A (Sony Corporation), 02 May, 1997 (02.05.97), page 1 (Family: none)	1-28

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
27 November, 2000 (27.11.00)

Date of mailing of the international search report
05 December, 2000 (05.12.00)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.



•

•

•

•

国際調査報告

国際出願番号 PCT/JP00/06130

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ H01L21/027, G03F7/20, G02F1/37, H01S3/06,
H01S3/00

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ H01L21/027, G03F7/20, G02F1/37, H01S3/06,
H01S3/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1926-1996年
日本国公開実用新案公報 1971-2000年
日本国登録実用新案公報 1994-2000年
日本国実用新案登録公報 1996-2000年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	US, 5838709, A (Nikon Corporation) 17. 11月. 1998 (17. 11. 98) 全文、全図 & JP, 8-334803, A & JP, 9-148658, A	1-28
A	JP, 10-135555, A (株式会社日立製作所) 22. 5月. 1998 (22. 05. 98) 第1頁 (ファミリーなし)	1-28

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

27. 11. 00

国際調査報告の発送日

05.12.00

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)
郵便番号100-8915
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

岩本 勉

2M

9355

電話番号 03-3581-1101 内線 3274

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	JP, 8-97125, A (ソニー株式会社) 12. 4月. 1996 (12. 04. 96) 第1頁 (ファミリーなし)	1-28
A	JP, 9-114100, A (ソニー株式会社) 2. 5月. 1997 (02. 05. 97) 第1頁 (ファミリーなし)	1-28